



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



**CALIBRAÇÃO DO MODELO AQUACROP E NECESSIDADES HÍDRICAS DA
CULTURA DO TOMATEIRO CULTIVADA EM CONDIÇÕES TROPICAIS**

JOHERLAN CAMPOS DE FREITAS

Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA

Orientador

CAMPINA GRANDE – PB

Março de 2018

CALIBRAÇÃO DO MODELO AQUACROP E NECESSIDADES HÍDRICAS DA CULTURA DO TOMATEIRO CULTIVADA EM CONDIÇÕES TROPICAIS

JOHERLAN CAMPOS DE FREITAS

Tese apresentada ao Programa de Pós – Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Meteorologia.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
AGROMETEOROLOGIA E MICROMETEOROLOGIA

SUB-ÁREA
NECESSIDADES HÍDRICAS DE CULTURAS

ORIENTADOR
PROF. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA

CAMPINA GRANDE – PB
Março de 2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

F866c	Freitas, Joherlan Campos de.
	Calibração do modelo AquaCrop e necessidades hídricas da cultura do tomateiro cultivada em condições tropicais / Joherlan Campos de Freitas. – Campina Grande, 2018.
	119 f.: il. color.
	Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2017.
	"Orientação: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva".
	Referências.
	1. Agrometeorologia. 2. AquaCrop. 3. Calibração. 4. Tomate.
	I. Silva, Vicente de Paulo Rodrigues da. II. Título.
CDU 551.1:631(043)	

JOHERLAN CAMPOS DE FREITAS

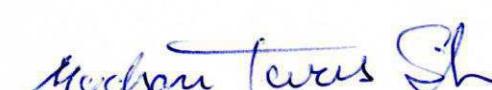
CALIBRAÇÃO DO MODELO AQUACROP E NECESSIDADES HÍDRICAS DA
CULTURA DO TOMATEIRO CULTIVADA EM CONDIÇÕES TROPICAIS

TESE APROVADA EM 15/12/2017

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. ANTONIO RICARDO SANTOS DE ANDRADE
Unidade Acadêmica de Garanhuns
Universidade Federal Rural de Pernambuco


Prof. Dr. INAJÁ FRANCISCO DE SOUSA
Departamento Engenharia Agronômica
Centro de Ciências Agronómicas Aplicadas
Universidade Federal de Sergipe

DEDICATÓRIA

Dedico primeiramente a Deus por ser o grande responsável por minha vida e pela realização desta tese. A minha mãe Laurice Campos de Freitas, meu pai José de Freitas Cantalice (in memoriam), minha esposa Joyce Vidal de Negreiros e minha tia Maria José Cavalcanti. Dedico também a todos aqueles que acreditaram na minha capacidade de realizar este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por tudo o que proporcionou desde meu nascimento até os dias de hoje e pelo direcionamento na minha vida através de sua infinita sabedoria. Agradeço pela realização desta tese. Deus, muito obrigado por tudo!

À minha mãe Laurice Campos de Freitas e ao meu pai José de Freitas Cantalice (*in memoriam*), meus sinceros agradecimentos por tudo durante toda minha vida, em especial, pela dedicação, pelo amor, carinho, incentivo e pela concretização deste trabalho. Meus Pais, muito obrigado por tudo!

À minha esposa, Joyce Vidal de Negreiros Campos, também por ajudar-me em todo o desenvolvimento da tese. Mesmo em momentos difíceis, ela mostrou ser uma grande mulher, através de lindos gestos de amor que demonstra o quanto ela desejou que me tornasse Doutor. Joyce, muito obrigado!

Ao Professor Dr. Antonio Ricardo Santos de Andrade que, mesmo através da distância, conseguiu ajudar-me na condução desse trabalho da melhor forma possível. Ao senhor, muito obrigado!

Aos amigos de Curso que, ao longo desses anos, trocamos experiências pelas alegrias vividas e, principalmente, o companheirismo existente em nossa turma.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pela grande contribuição como Universidade no meu crescimento acadêmico através desse título de Doutor.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por acreditar em minha capacidade e pela contribuição através da bolsa e taxa de bancada para que pudesse realizar todo o Doutorado em Meteorologia.

Ao meu orientador professor Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, pela colaboração através de seus conhecimentos e de suas experiências vividas nesse caminho.

Ao amigo Emerson Ricardo Rodrigues Pereira por sua grande colaboração e incentivo tanto antes quanto após o ingresso no doutorado.

Aos amigos Emmanuel Fabiano Marques da Silva, André Bezerra Oliveira e Valério João da Silva pelas imensas colaborações no decorrer do processo de desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (UACA) por suas contribuições durante o período de disciplinas do curso.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram de maneira direta ou indireta para a conclusão deste trabalho. Muito Obrigado!

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE QUADROS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xiv
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS	21
2.1. Geral	21
2.2. Específicos	21
3. REVISÃO DE LITERATURA	22
3.1. Aspectos gerais da cultura do tomateiro	22
3.1.1. Origem	22
3.1.2. Anatomia da cultura	22
3.1.3. Clima	23
3.1.4. Época e área de plantio	24
3.1.5. Crescimento e desenvolvimento	25
3.1.6. Consumo de água do tomateiro	26
3.1.7. A resposta ao estresse	26
3.1.8. Irrigação e necessidade hídrica da cultura do tomateiro	27
3.1.9. Pesquisas realizadas com o tomate	28
3.2. Estudo da umidade do solo por meio de sondas capacitivas	29
3.3. Balanço hídrico	31
3.4. Coeficiente e evapotranspiração de uma cultura	33
3.4.1. Fatores determinantes no coeficiente de cultura	33
3.4.1.1. Tipo de cultura	34
3.4.1.2. Clima	34
3.4.1.3. Evaporação do solo	34
3.4.2. Estágios de crescimento das culturas	35
3.4.2.1. Estágio inicial	35
3.4.2.2. Estágio de desenvolvimento das culturas	35
3.4.2.3. Estágio intermediário	36
3.4.2.4. Estágio final	36
3.4.3. Evapotranspiração da cultura (ETc)	36
3.4.4. Coeficientes de cultura simples e dual	36
3.4.4.1. Coeficiente de cultura simples (Kc)	36
3.4.4.2. Coeficiente de cultura dual (Kcb + Ke)	37
3.4.5. Curva do coeficiente de cultura	37
3.4.6. Pesquisas realizadas com o coeficiente de cultura Kc	37
3.5. Os modelos agrícolas	41
3.5.1. O modelo AquaCrop	42
4. MATERIAL E MÉTODOS	45
4.1. Área de estudo	45
4.1.1. Área experimental	46

4.2.	Análise de solo e adubação	47
4.3	Cultura utilizada	47
4.4.	Preparo da área e teste de vazão	48
4.5.	Época do transplantio	49
4.6.	Tratos culturais	50
4.6.1.	Controle de plantas invasoras, pragas, doenças etc	51
4.7.	Delineamento experimental	51
4.8.	Cálculo da evapotranspiração de referência (ET ₀)	53
4.9.	Irrigação	54
4.10.	Monitoramento da umidade do solo	55
4.11.	Balanço hídrico e evapotranspiração da cultura (ET _c)	56
4.12.	Coeficiente de cultura (K _c)	58
4.13.	Modelo de simulação de cultura: FAO 33	58
4.13.1.	Descrição do AquaCrop	59
4.13.1.1.	Clima	61
4.13.1.2.	Cultura	62
4.13.1.3.	Estresse hídrico	62
4.13.1.4.	Fenologia	63
4.13.1.5.	Desenvolvimento do dossel	63
4.13.1.6.	Sistema radicular e extração de água	67
4.13.1.7.	Transpiração	69
4.13.1.8.	Produção de biomassa	69
4.13.1.9.	Solo	70
4.13.1.10.	Manejo	71
4.14.	Variáveis analisadas	71
4.14.1.	Características físicas do tomate	71
4.14.2.	Variáveis utilizadas no modelo AquaCrop	72
4.15.	Análises estatísticas	73
4.16.	Processo de calibração e validação do AquaCrop	73
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.1.	Análise de propriedades físicas do solo	76
5.2.	Primeiro experimento da cultura do tomateiro realizado no ano de 2016	77
5.2.1	Análise das características climáticas do local no período seco	77
5.2.2.	Demanda hídrica do tomateiro no período seco	79
5.2.3.	Variáveis fenométricas do tomateiro analisadas em 2016	79
5.2.3.1.	Variáveis de crescimento para o período seco	79
5.2.3.2.	Variáveis de produção para o período seco	82
5.3.	Segundo experimento da cultura do tomateiro realizado no ano de 2017	88
5.3.1	Análise das características climáticas do local no período chuvoso	88
5.3.2	Demanda hídrica do tomateiro no período chuvoso	90
5.3.3.	Variáveis fenométricas do tomateiro analisadas em 2017	90
5.3.3.1.	Variáveis de crescimento para o período chuvoso	90
5.3.3.2.	Variáveis de produção para o período chuvoso	94
5.4.	Determinação da evapotranspiração e do coeficiente de cultivo do tomateiro	101
5.5.	Modelagem com o AquaCrop	102
5.5.1.	Calibração	103
5.5.2.	Validação do AquaCrop	107
6.	CONCLUSÕES	110
7.	REFERÊNCIAS	111

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01 O efeito da evaporação em Kc. A linha horizontal representa o Kc quando a superfície do solo é mantida constantemente úmida. A linha curva corresponde ao Kc quando a superfície do solo é mantida seca, porém a cultura recebe água suficiente para manter a transpiração total .	35
Figura 02 Localização do município de Campina Grande-PB	45
Figura 03 Estação Agrometeorológica Experimental (EstAgro-DCA) da Universidade Federal de Campina Grande-PB	46
Figura 04 Preparo da área antes de ser efetuado o transplantio: a) preparação do solo para adubação; b) determinação da vazão média (l/h) por gotejador na área de estudo	49
Figura 05 Etapas do transplantio: a) bandeja contendo aproximadamente 200 mudas do tomateiro variedade “Shanty”; b) mudas transplantadas no dia 09-09-2016	49
Figura 06 Sistema de condução dos tomateiros: a) logo após o transplantio (1º experimento); b) após a substituição das varetas pelo fitilho, utilizados como apoio até o final do experimento (1º experimento); c) conduzidos no final do 1º experimento; d) realizados com auxílio de vários fitilhos laterais e também verticais no 2º experimento	50
Figura 07 Espacialização aleatória dos tratamentos na área experimental. T: representa os tratamentos, 1, 2, 3, 4 e 5; B: representa as repetições 1, 2, 3 e 4 e R: utilizado apenas para diferenciar os dois canteiros contendo cada tratamento	52
Figura 08 Parcela de plantas disponíveis para análises desprezando aquelas que poderiam sofrer o efeito de bordadura	52
Figura 09 Monitoramento de água no solo. a) posicionamento dos tubos em PVC instalados nos canteiros; b) processo de coleta da umidade do solo realizados em dias de cada semana de estudo; c) equipamento (Diviner 2000)	56
Figura 10 Evolução do AquaCrop a partir da equação (8), com base na introdução de duas etapas intermediárias: a separação da evaporação do solo (E) da transpiração da cultura (Tr) e a obtenção do rendimento (Y) da biomassa (B) e do índice de colheita (HI). A relação (a'), que liga o rendimento à evapotranspiração da cultura, é expressa através da equação (8) através do parâmetro Ky e normalmente se aplica a períodos de longo prazo. A relação (a), ligando a biomassa à transpiração da cultura, é expressa através da equação (9) através do parâmetro WP e tem um passo de tempo diário	61
Figura 11 Exemplo da variação da cobertura do dossel verde ao longo de um ciclo de cultura sob condições de não-estresse. CCo e CCx são cobertura inicial e máxima do dossel, respectivamente; o CGC é o coeficiente de crescimento do dossel; CDC é o coeficiente de declínio do dossel verde	66
Figura 12 Representação esquemática generalizada do processo de desenvolvimento da profundidade de enraizamento ao longo do tempo .	68

Figura 13	Dados meteorológicos: a) temperaturas do ar (°C) máxima e mínima, b) umidades relativas do ar (%) máxima e mínima, c) velocidade do vento (m/s), d) radiação solar (W/m ²), e) evapotranspiração de referência (mm/dia) e f) precipitação pluvial (mm/dia), ocorridos durante a execução do 1º experimento do tomateiro	78
Figura 14	Médias dos valores das variáveis de crescimento: a) altura da planta (cm) e b) diâmetro do caule (mm) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro	80
Figura 15	Médias dos valores das variáveis de produção: a) peso do fruto (g), b) diâmetro transversal do fruto (mm), c) diâmetro longitudinal do fruto (mm) e d) número de frutos por planta, para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro	82
Figura 16	Equações de regressão para os valores médios das variáveis de produção a) peso do fruto (g), b) diâmetro transversal do fruto (mm), c) diâmetro longitudinal do fruto (mm) e d) número de frutos por planta em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro	83
Figura 17	Dados meteorológicos: a) temperaturas do ar (°C) máxima e mínima, b) umidades relativas do ar (%) máxima e mínima, c) velocidade do vento (m/s), d) radiação solar (W/m ²), e) evapotranspiração de referência (mm/dia) e f) precipitação pluvial (mm/dia), ocorridos durante a execução do 2º experimento do tomateiro	89
Figura 18	Médias dos valores das variáveis de crescimento: a) altura da planta (cm) e b) diâmetro do caule (mm) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 2º experimento do tomateiro	90
Figura 19	Raízes do tomateiro: a) tamanho médio máximo da raiz (cm) e b) ajuste da equação de regressão em função das lâminas de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição de água pela necessidade hídrica do tomateiro realizado na execução do 2º experimento	93
Figura 20	Médias dos valores das variáveis de produção: a) peso do fruto (g), b) diâmetro transversal do fruto (mm), c) diâmetro longitudinal do fruto (mm) e d) número de frutos por planta, para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 2º experimento do tomateiro	94
Figura 21	Equações de regressão para os valores médios das variáveis de produção a) peso do fruto (g), b) diâmetro transversal do fruto (mm), c) diâmetro longitudinal do fruto (mm), d) número de frutos por planta e e) teor de sólidos solúveis (°Brix) dos frutos em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 2º experimento do tomateiro	95
Figura 22	Valores médios das variáveis de produção: a) número de frutos comerciais (NFC) e número de frutos não-comerciais (NFNC); b) produtividade (kg) total (PT), produtividade (kg) comercial PC (kg) e produtividade (kg) não-comercial (PNC) em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 2º experimento do tomateiro	99

Figura 23	Comportamentos diários: a) evapotranspiração (mm) e b) coeficiente de cultura (Kc) do tomateiro para a região de estudo determinados por meio do balanço hídrico do solo através da execução (2016) e repetição (2017) dos experimentos	101
Figura 24	Comparação entre os valores observados e simulados pelo AquaCrop no processo final de calibração para a cultura do tomateiro durante a execução do 2º experimento	103
Figura 25	Resultados gerados pelo modelo AquaCrop após a calibração local para: a) cobertura do solo pelo dossel (%); b) profundidade da raiz (m); c) biomassa total produzida (ton/ha); d) produtividade simulada (ton/ha); e) processo de formação do índice de colheita (%) e f) produtividade em função da demanda de água evapotranspirada pela cultura (kg/m ³)	106
Figura 26	Estudo dos valores observados em condições de campo com os simulados pelo modelo AquaCrop no processo de validação para os tratamentos de 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura: a) comportamento das biomassas totais (ton/ha) observada e simulada para os tratamentos; b) relação dos valores observados e estimados para a biomassa total (ton/ha); c) comportamento das produtividades (ton/ha) observada e simulada para os tratamentos; d) relação dos valores observados e estimados para a produtividade (ton/ha)	107

LISTA DE TABELAS

		Pág.
Tabela 01	Condições favoráveis no processo de cultivo do tomateiro (ALVARENGA, 2013; BATTILANI et al., 2012)	24
Tabela 02	Dados meteorológicos climáticos médios de Campina Grande-PB no período de 1977 a 2015	46
Tabela 03	Valores do coeficiente de cultivo do tomateiro utilizados como base para a determinação da lâmina bruta aplicada aos tomateiros	54
Tabela 04	Resumo das propriedades físicas do solo na área experimental	76
Tabela 05	ANálise estatística das características físicas do solo na área de estudo .	77
Tabela 06	Resumo da análise de variância para a variável altura da planta (cm) em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura aos 16, 26, 36, 46 e 56 DAT ocorridos durante a execução do 1º experimento do tomateiro	80
Tabela 07	Comparação das médias da altura da planta (cm) aos 56 DAT que apresentaram significância estatística no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro	81
Tabela 08	Resumo da análise de variância para a variável diâmetro do caule (mm) em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura aos 16, 26, 36, 46 e 56 DAT ocorridos durante a execução do 1º experimento do tomateiro	82
Tabela 09	Resumo das análises de variância para as variáveis de produção: a) peso do fruto (g), b) diâmetro transversal do fruto (mm), c) diâmetro longitudinal do fruto (mm) e d) número de frutos por planta para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro	85
Tabela 10	Comparação das médias das variáveis de produção que apresentaram significância estatística no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro	85
Tabela 11	Resumo das análises de variância para as variáveis de produção: número de frutos comerciais (NFC) e número de frutos não-comerciais (NFNC) em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro	86
Tabela 12	Comparação das médias para as variáveis: número de frutos comerciais e número de frutos não-comerciais que apresentaram significância estatística no Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro	86

Tabela 13	Resumo da análise de variância para a variável altura da planta (cm) em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura aos 17, 27, 37, 48 e 58 DAT ocorridos durante a execução do 2º experimento do tomateiro	91
Tabela 14	Resumo da análise de variância para a variável diâmetro do caule (mm) em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura aos 17, 27, 37, 48 e 58 DAT ocorridos durante a execução do 2º experimento do tomateiro	92
Tabela 15	Resumo das análises de variância para as variáveis de produção: a) peso do fruto (g), b) diâmetro transversal do fruto (mm), c) diâmetro longitudinal do fruto (mm), d) número de frutos por planta e e) teor de sólidos solúveis (°Brix) dos frutos, para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 2º experimento do tomateiro	97
Tabela 16	Comparação das médias das variáveis de produção que apresentaram significância estatística no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 2º experimento do tomateiro	98
Tabela 17	Resumo das análises de variância para as variáveis de produção: número de frutos comerciais (NFC), número de frutos não-comerciais (NFNC), produtividade (kg) total (PT), produtividade (kg) comercial PC e produtividade (kg) não-comercial (PNC), em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 2º experimento do tomateiro	100
Tabela 18	Determinação do coeficiente de cultura do tomateiro em condição de campo durante a execução (2016) e repetição (2017) dos experimentos	102
Tabela 19	Comparação entre os valores contidos no AquaCrop e os valores calibrados para a cultura do tomateiro no ano de 2017	104
Tabela 20	Comparação entre os valores observados e simulados pelo AquaCrop para os tratamentos de 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura	108
Tabela 21	Estatísticas utilizadas na validação do modelo AquaCrop para biomassa total (ton/ha) e produtividade (ton/ha) do tomateiro	108

LISTA DE QUADROS

	Pág.
Quadro 01	47
Quadro 02	51
Quadro 03	51
Etapas de aplicação de produtos ao longo do experimento	
Relação de produtos utilizados para o controle no experimento	
Significado dos tratamentos aplicados nos 2 experimentos do tomateiro	

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Ascensão capilar
ANOVA	Análise de variância
ARM	Armazenamento de água no solo
B	Biomassa seca
CC	Cobertura do dossel verde
CC*	Equação de ajuste para os efeitos microadvectivos na CC
CDC	Coeficiente de declínio do dossel
CDC _{aj}	Coeficiente de declínio do dossel ajustado
CCo	Cobertura inicial do dossel
CC _x	Cobertura máxima do dossel para condições ideais
CGC	Coeficiente de crescimento do dossel
CGC _{aj}	Coeficiente de crescimento do dossel ajustado
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO ₂	Dióxido de carbono
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
D _p	Drenagem profunda
d	Índice de Willmott
DAT	Dias após transplantio
DCA	Departamento de Ciências Atmosféricas
dZ/dt	Taxa de expansão das raízes
E	Evaporação não-produtiva do solo
e _a	Pressão de vapor real
E _{AP}	Eficiência de aplicação do sistema de irrigação
EF	Coeficiente de eficiência do modelo Nash-Sutcliffe
EPI	Equipamento de proteção individual
ERD	Profundidade efetiva de enraizamento
e _s	Pressão de saturação do vapor d'água atmosférica
EstAgro	Estação Agrometeorológica Experimental
ET	Evapotranspiração
ET _a	Evapotranspiração real
ET _c	Evapotranspiração a cultura
ET _o	Evapotranspiração de referência
ET _{max}	Evapotranspiração máxima
f _{age}	Coeficiente de envelhecimento
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
FC	Capacidade de campo
FDR	Reflectometria no domínio da frequência
Fol	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>lycopersici</i>
f _{shape}	Fator de forma da curva
G	Densidade de fluxo de calor do solo
GDD	Graus dia de crescimento
HI	Índice de colheita
H _{Io}	Índice de colheita de referência
I	Irrigação
IAF	Índice de área foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

K _c	Coeficiente da cultura
K _{cb}	Coeficiente de colheita basal
K _{c_{FAO}}	Coeficiente de cultura obtido da FAO
K _{c ini}	Coeficiente da cultura no período inicial
K _e	Coeficiente de evaporação de água do solo
K _{c_{Tr,x}}	Coeficiente para a máxima transpiração da cultura
K _s	Coeficiente individual de estresse
K _{sat}	Condutividade hidráulica de saturação
K _{s_{exp}}	Coeficiente de estresse hídrico do crescimento expansivo
K _{s_{sen}}	Coeficiente de estresse hídrico para a senescênci a do dossel
K _{s_{sto}}	Coeficiente de estresse hídrico para o fechamento dos estômatos
K _y	Coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico
LB	Lâmina bruta
n	Fator de forma da função
NFC	Número de frutos comerciais
NFNC	Número de frutos não comerciais
NHC	Necessidade hídrica da cultura
NRMSE	Raiz do erro quadrático médio normalizado
n _o	Número de observações
ns	Não-significativo
O	Oeste
	Média dos valores observados
Oi	Valores observados em campo
Pr	Precipitação
p	Redução fracionária da quantidade total de água disponível
PC	Produtividade comercial
Pi	Valores simulados pelo AquaCrop
PNC	Produtividade não-comercial
Pst	<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>tomato</i>
PT	Produtividade total
PWP	Ponto de murcha permanente
Q	Vazão de água
R	Escoamento superficial
Rn	Saldo de radiação na superfície da cultura
RMSE	Raiz do erro quadrado médio
Rs	Radiação solar
R ²	Coeficiente de determinação
S	Sul
Sl	<i>Stemphylium lycopersici</i>
t	Tempo
TAD	Total de água disponível
TDR	Reflectometria no domínio do tempo
Tm	Temperatura média diária do ar a 2 m de altura
Tmax	Temperatura máxima do ar
Tmin	Temperatura mínima do ar
t _o	Tempo desde o plantio até a emergência efetiva
Tr	Transpiração da cultura
TSWV	<i>Tomato spotted wilt virus</i>
tx	Tempo após o plantio quando Z _x for atingido
TYLCV	<i>Tomato yellow leaf curl virus</i>

T1, T2,	
T3, T4 e T5	Tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura.
UACA	Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
URmax	Umidade relativa máxima do ar
URmin	Umidade relativa mínima do ar
u_2	Velocidade do vento a 2 m de altura
Vd	<i>Verticillium dahliae</i>
Z_{BH}	Profundidade considerada para o balanço hídrico
Z	Profundidade efetiva de enraizamento no tempo t
Z_{ini}	Profundidade de plantio na semeadura
Z_n	Profundidade mínima efetiva de enraizamento
Z_x	Profundidade máxima efetiva de enraizamento
WP	Produtividade da água
WP*	Produtividade da água normalizada
Y	Produtividade final
Ya	Rendimento real
Y_{max}	Rendimento máximo
γ	Constante psicrométrica
θ	Conteúdo de água
∞	Infinito
Δ	Inclinação da curva de pressão de vapor saturado
θ_2	Umidade do solo encontrada no tempo 2
θ_1	Umidade do solo encontrada no tempo 1
ΔS	Variação do armazenamento de água do solo no intervalo de tempo considerado

CALIBRAÇÃO DO MODELO AQUACROP E NECESSIDADES HÍDRICAS DA CULTURA DO TOMATEIRO CULTIVADA EM CONDIÇÕES TROPICAIS

RESUMO

Este trabalho teve como principal objetivo realizar a calibração do modelo AquaCrop para a cultura do tomateiro de modo a torná-lo aplicável na simulação da produtividade em regiões semiáridas tropicais e em especial para o Agreste da Paraíba. Nesta pesquisa foram realizados dois experimentos de campo na área de estudo, localizada no município de Campina Grande-PB entre os anos de 2016 (período seco) e 2017 (período chuvoso) utilizando a cultura do tomateiro variedade “Shanty”. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com 5 tratamentos que consistiram de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura com 4 repetições cada, totalizando 20 parcelas experimentais. Foram analisadas características da planta e de seu fruto, buscando entender o comportamento do crescimento e produção em função desta variação. Foi determinado também a evapotranspiração da cultura juntamente com seu coeficiente. Foram utilizados dados obtidos no tratamento de 100% de reposição para calibração do modelo AquaCrop e a sua validação deu-se através da comparação dos valores encontrados pelo modelo com os observados em campo em condições de deficiência hídrica. Dentre os vários resultados encontrados na pesquisa, destacam-se que as variáveis como peso, diâmetro transversal e diâmetro longitudinal do tomate apresentaram diferenças significativas para os tratamentos nos dois experimentos. A lâmina recomendada para irrigação foi a de 100%, no entanto, os resultados mostraram que a reposição de 80% apresentou boa aproximação desta recomendada. Os valores do K_c encontrados para os estágios inicial, desenvolvimento, intermediário, final e colheita foram 0,40; 0,75; 1,11; 0,93 e 0,70, respectivamente. Por fim, essa proposta de validação do modelo AquaCrop foi satisfatória sob o ponto de vista estatístico por apresentar resultados excelente e bom para a biomassa total e produtividade, apresentando coeficientes de determinação de 99% e 90%, respectivamente, confirmando a capacidade do modelo de realizar boas estimativas de produtividades em situações de déficit hídrico no tomateiro.

Palavras-chave: AquaCrop, calibração, tomate, evapotranspiração da cultura.

CALIBRATION THE AQUACROP MODEL AND WATER NEEDS OF TOMATO CROP CULTIVATED IN TROPICAL CONDITIONS

ABSTRACT

The main objective of this work was to calibrate the AquaCrop model for the tomato crop in order to make it applicable in the simulation of productivity in tropical semiarid regions and especially for the Agreste of Paraíba. In this research two field experiments were carried out in the study area, located in the city of Campina Grande-PB between the years 2016 (dry period) and 2017 (rainy season) using the "Shanty" variety. The experimental design was completely randomized, with 5 treatments that consisted of 100, 80, 60, 40 and 20% of replenishment of the water requirement of the crop with 4 replications each, totaling 20 experimental plots. The characteristics of the plant and its fruit were analyzed, trying to understand the behavior of growth and production in function of this variation. Evapotranspiration of the crop was also determined along with its coefficient. We used data obtained in the treatment of 100% replacement for calibration of the AquaCrop model and its validation was obtained by comparing the values found by the model with those observed in the field under conditions of water deficit. Among the several results found in the research, the variables such as weight, transverse diameter and longitudinal diameter of the tomato showed significant differences for the treatments in the two experiments. The recommended blade for irrigation was 100%, however, the results showed that the 80% replacement presented a good approximation of this recommended. Kc values found for the initial, development, intermediate, final and harvest stages were 0.40; 0.75; 1.11; 0.93 and 0.70, respectively. Finally, this proposal of validation of the AquaCrop model was satisfactory from the statistical point of view because it presented excellent and good results for the total biomass and productivity, presenting determination coefficients of 99% and 90%, respectively, confirming the capacity of the model to make good estimates of yields in situations of water deficit in tomato.

Keywords: AquaCrop, calibration, tomato, crop evapotranspiration.

1. INTRODUÇÃO

Uma das hortaliças mais conhecidas na mesa dos brasileiros é o tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), sendo uma fonte importante de vitaminas e uma cultura comercial importante para pequenos e grandes agricultores. Ela faz parte não somente de tradições culinárias, mas também pelo seu valor econômico em diversos locais no mundo.

De acordo com Campeche et al. (2017) o tomateiro é uma hortaliça de grande importância econômica e social sendo cultivado nas mais diversas regiões do Brasil. No ano de 2015, a área destinada para plantação de tomateiro foi de 63.626 ha, liderada pela região Sudeste com área de 29.780 ha. No Nordeste, a área destinada neste mesmo ano foi de 12.905 ha, destacando-se os estados da Bahia, Pernambuco e Ceará com 7.103, 2.527 e 2.198 ha, respectivamente (IBGE, 2016). Mas quando se considera todo o território brasileiro, observa-se redução de área plantada para o tomateiro nos anos de 2015 e 2016 (IBGE, 2016).

Fica evidente que essa redução da cultura do tomateiro, juntamente com outras produções de diversas culturas, é muitas vezes afetada pela discrepância da precipitação pluviométrica da região ao longo dos anos, que prejudica a produtividade, necessitando assim, da irrigação como complemento e manejo adequado para suprir a baixa produção da cultura do tomateiro vivida ao longo dos anos não somente no Nordeste como também em diversas partes do Brasil e do mundo. Hoje é cada vez mais importante levar em conta o regime pluviométrico de uma região como o principal fator de interação nessa complexa engrenagem chamada produção agrícola, destacando também a temperatura do ar que exerce papel de extrema relevância nesta produção agrícola.

No espaço complexo entre o manejo adequado e a produtividade, onde se busca uma boa produtividade levando-se em conta escassez hídrica, é notório cada vez mais a importância da modelagem agrícola como auxílio na procura de respostas que ajudem a entender o equilíbrio entre escassez e rendimento. Porém, esses modelos ainda esbarram em itens importantes como distâncias entre teoria e prática, entre modelo e usuário final, custos elevados na simulação de resultados, dentre outros. Nesse contexto, um modelo que se destaca e que promete aliar teoria e prática, através da simplificação da compreensão dos conhecimentos impostos no contínuo solo-planta-atmosfera, é denominado AquaCrop, que surge com muita força no auxílio da simulação agrícola, podendo levar em conta o estresse hídrico de uma cultura, dentre outros fatores importantes na simulação.

Mas como todo modelo, o AquaCrop também requer à devida calibração, para que seu desempenho possa ser comparado às condições de outros locais, e que se torne ferramenta

prática na simulação das respostas de uma cultura. Diversos pesquisadores testaram a capacidade do AquaCrop para simulação de produtividade de diferentes culturas ao redor do mundo em diversos tipos de ambientes e todos eles relataram resultados positivos, como por exemplo, cana-de-açúcar (ALENCAR, 2014), batata (RAZZAGHI et al., 2017), algodão (TAN et al., 2018), dentre outros. Por outro lado, muitas pesquisas têm sido realizadas visando estudos de produtividade, eficiência de uso de água e consumo hídrico em diferentes culturas no Brasil, demonstrando assim, a importância de se avaliar características de uma cultura, levando-se em consideração diferentes níveis de reposição de água (AZEVEDO et al., 2005; SILVA et al., 2009; SILVA et al., 2013). Neste sentido, torna-se importante calibrar um modelo capaz de prever com antecedência colheitas, bem como determinar as necessidades hídricas do tomateiro cultivado sob irrigação em condições climáticas semiáridas. Desta forma, o presente trabalho tem os objetivos especificados abaixo.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral: Realizar a calibração do modelo AquaCrop para a cultura do tomateiro de modo que possa retratar mais precisamente a simulação da produtividade da cultura em regiões semiáridas tropicais e, em especial, para o Agreste paraibano.

2.2. Específicos:

- (i) Estudar variáveis fenométricas do tomateiro cultivada em regiões tropicais em função das reposições de 100, 80, 60, 40 e 20% da necessidade hídrica da cultura;
- (ii) Avaliar o crescimento e produtividade do tomateiro obtido em condições de campo através de ferramentas da estatística;
- (iii) Determinar o coeficiente de cultivo do tomateiro variedade “Shanty” cultivada na região de estudo;
- (iv) Realizar a calibração local do modelo AquaCrop de modo a torná-lo aplicável nas simulações para o tomateiro nesta região de estudo;
- (v) Realizar simulações da produtividade da cultura através do AquaCrop com intuito de saber as respostas do modelo aos níveis de irrigação de 80, 60, 40 e 20% da necessidade hídrica do tomateiro.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Aspectos gerais da cultura do tomateiro

3.1.1. Origem

O tomate tem sua origem nas regiões andinas do Peru, Bolívia e Equador e seu fruto era chamado pelos indígenas mexicanos de “tomati” ou “jitomate”. Quando os espanhóis chegaram à América, o tomate já era utilizado no México e em vários outros locais da América Central e do Sul. Levado para a Europa, começou então a ser cultivado no Século XVI, mas seu consumo difundiu-se e ampliou-se somente no Século XIX (DUSI et al., 1993).

A introdução do tomateiro no Brasil ocorreu pelos imigrantes europeus (principalmente italianos, espanhóis e portugueses), no final do século XIX. Na verdade, a difusão e o incremento no consumo começaram a ocorrer apenas depois da primeira guerra mundial, por volta de 1930 (ALVARENGA, 2013).

3.1.2. Anatomia da cultura

O tomateiro é uma planta perene, de porte arbustivo, cultivado como anual, desenvolvendo-se nas formas rasteira, semiereta e ereta. Seu sistema radicular é constituído de raiz principal, raízes secundárias e adventícias, onde a raiz principal ou pivotante pode alcançar 1,5 m de profundidade caso não haja interrupções (ALVARENGA, 2013).

Com relação a parte aérea, na haste principal formam-se de 6 a 12 folhas, que crescem com uma filotaxia de 2/5, antes que uma gema se transforme em uma inflorescência. A partir daí, para cada três folhas surge uma haste floral. Nas axilas dessas folhas ocorrem gemas que darão origem a hastes secundárias, apresentando desenvolvimento semelhante ao caule principal (ALVARENGA, 2013).

O caule do tomateiro no início do desenvolvimento é ereto, herbáceo, suculento e coberto por pelos glandulares ou não glandulares que saem da epiderme. Debaixo dessa epiderme, encontra-se o córtex, cujas células mais externas contêm clorofila e são fotossintéticas, enquanto que as mais internas são do tipo colenquimático, que ajudam no suporte da planta (ALVARENGA, 2013). Ainda de acordo com o autor suas folhas são alternadas, compostas, com um grande folíodo terminal e possuem cerca de 6 a 8 folíodos laterais que podem, por sua vez, ser compostos.

As folhas são cobertas de pelos semelhantes ao caule, com iniciação ocorrendo em intervalos de 2-3 dias, de acordo com as condições do ambiente. A flor do tomateiro é regular e hipógina, contendo sépalas e pétalas (5 ou mais cada) dispostas de forma helicoidal, com o mesmo número de estames e com um ovário bi ou pluricelular. Já o fruto é uma baga, carnosa e suculenta, bi, tri, ou pluricelular, que se desenvolve a partir de um ovário com 5-10 mg de peso e alcança, quando maduro, peso final entre 5 e 500 g, em função da cultivar e das condições de desenvolvimento. Por fim, as sementes do tomateiro são reniformes (forma de rins), pequenas, apresentando minúsculos pelos e têm coloração marrom-claro (ALVARENGA, 2013).

3.1.3. Clima

O tomateiro é classificado como cultura cosmopolita, pela tolerância às variações climáticas, conduzido em regiões de clima tropical, subtropical e temperado (FILGUEIRA, 2000). A temperatura é de extrema importância para o crescimento vegetativo da cultura como um todo. De acordo com Dusi et al. (1993) a faixa de 20 a 25 °C favorece a germinação, enquanto a de 18 a 25 °C ajuda o desenvolvimento vegetativo. Temperaturas noturnas altas também contribuem para o tomateiro crescer mais depressa. Mas além de 32 °C as flores caem, o desenvolvimento dos frutos fica inibido e formam-se tomates ocos.

A cultura é sensível à geada, pois baixas temperaturas, quando persistem durante mais do que alguns dias, ocasionam a redução da taxa de iniciação da folha e do fardo, e a planta produz folhas mais espessas, de modo que elas interceptam menos luz; a frutificação é reduzida como resultado da má polinização. A exposição a temperaturas elevadas provoca uma redução do número de grãos de pólen e prejudica a sua viabilidade e a capacidade de germinação, que afeta consideravelmente a frutificação. A umidade elevada, combinada com temperaturas acima de cerca de 27 °C, também afeta a germinação do pólen, o que resulta num rendimento menor. O tomateiro, como acontece com muitas outras culturas, pode compensar as temperaturas diurna e noturna, mitigando as tensões já sofridas. Cultivares de tomateiro criados para climas semiáridos quentes, no entanto, não respondem negativamente a temperaturas máximas na faixa de 35-40 °C (BATTILANI et al., 2012).

A umidade relativa tem efeito no desenvolvimento e produção do tomateiro, sendo que as chuvas intensas e altas umidades relativas favorecem a presença de doenças levando ao uso de inseticidas e pesticidas. Recomenda-se que o tomateiro seja plantado em áreas com baixos

valores de umidade relativa e precipitação. Segundo Dusi et al. (1993) ventos quente e forte prejudicam tanto a floração quanto a frutificação.

A Tabela 1 exibe uma síntese de outras características importantes para uma boa produção do tomateiro com alguns aspectos necessários a serem mencionados.

Tabela 1. Condições favoráveis no processo de cultivo do tomateiro (ALVARENGA, 2013; BATTILANI et al., 2012)

Parâmetros para o tomateiro	Valor/Faixa	Condições favoráveis e/ou características
Temperaturas do ar (°C)	15 - 25	Germinação das sementes
	20 - 25	Formação de mudas
	18 - 24	Florescimento
	19 - 24	Pegamento de frutos (Dia)
	14 - 17	Pegamento de frutos (Noite)
	20 - 24	Fase de Maturação
Temperatura do solo (°C)	25 - 35	Para o desenvolvimento radicular
Umidade Relativa do ar (%)	50 - 70	Bom desenvolvimento da cultura
Insolação Total (h)	9 - 15	Desenvolvimento e produção
Radiação Total Diária (MJ/m ²)	0,85	Condição mínima para sucesso do florescimento
Consumo hídrico (mm)	400 - 800	Do período de emergência/transplantio até a colheita

3.1.4. Época e área de plantio

Com base nessas referências climáticas, pode-se dizer que a melhor época de plantio do tomateiro é aquela que oferece as seguintes condições para todo o ciclo da planta: temperaturas médias diárias variando de 18 a 25 °C, baixa umidade relativa do ar e baixo índice de chuvas por um período de 5 a 6 meses consecutivos (DUSI et al., 1993). O período de semeadura varia do fim de fevereiro a maio no Hemisfério Norte, ou a partir de agosto a meados de dezembro no Hemisfério Sul. Já essa temporada é muito menos definida nos trópicos e subtrópicos (BATTILANI et al., 2012).

De acordo com Dusi et al. (1993) deve-se selecionar a área com antecedência de 4 a 5 meses do plantio. A preferência é locais onde não haja solanáceas nativas, como a jurubeba, o juá e a maria-preta, e não tenham sido cultivados com berinjela, pimentão, jiló, fumo e batata, devido ao risco da presença de fungos e bactérias de solo transmissíveis ao tomateiro. No entanto, não havendo opção, admite-se o uso de área já cultivada com solanáceas, mas que estas não tenham sido as últimas a ocupar o local e principalmente não tenha havido problemas com infecção de fungos dos gêneros *Fusarium*, *Verticillium*, *Sclerotinia* e *Sclerotium* ou de bactérias, como *Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Erwinia*, *Corynebacterium*, dentre outras. Demais cuidados devem ser também tomados para o bom desenvolvimento do tomateiro, dentre os quais destacam-se a boa exposição ao sol, um local não estando sujeito a fortes ventos e nem

que favoreça ao acúmulo de ar frio ou de umidade, além de uma pequena declividade e fácil drenagem.

3.1.5. Crescimento e desenvolvimento

É comum optar pela transplantação com objetivo de alcançar a emergência, densidade e desenvolvimento da planta de maneira mais uniforme, devido às suas sementes serem difíceis de atingir a uniformidade e a alta porcentagem de emergência quando semeadas no campo. Geralmente, usa-se de cultivares convencionais quando se fala em semear de maneira direta, ou através do uso de sementes híbridas, porém esta última não é uma maneira rentável, levando-se em consideração o alto custo das sementes. A profundidade recomendada para semeadura é de 2 a 4 cm. Já o espaçamento entre plantas varia muito dependendo das condições, o custo das sementes ou mudas, tipo de planta e cultivares e práticas locais. A densidade varia de 2 a 6 plantas/m² e o espaçamento entre linhas varia de 0,75 m a 1,6 m, com o processamento de tomate plantado, muitas vezes mais denso que o tomate de mercado. Geralmente, o tomate começa a florescer cedo, 25-40 dias após o transplantio ou 35-50 dias após a emergência, dependendo em grande parte da temperatura (BATTILANI et al., 2012).

Alvarenga (2013) relata que o ciclo do tomateiro pode ser dividido em três fases distintas. A primeira fase tem duração de quatro a cinco semanas aproximadamente, indo do transplantante das mudas até o início do florescimento. A segunda fase com duração de cinco a seis semanas, iniciando-se por ocasião do florescimento e terminando no início da colheita dos frutos. Já a terceira fase vai do início ao final da colheita. O autor ressalta que é importante conhecer o início de uma e outra fase para a programação da fertirrigação.

Quando se fala em tomateiros cultivados existem, basicamente, três tipos: indeterminado, semideterminado e determinado. Plantas indeterminadas são altas (geralmente maiores do que 2 m de altura), com um crescimento vegetativo contínuo, com muito mais tempo após o início da floração do que nos outros dois tipos, onde a fruta amadurece gradualmente, a partir dos cachos basais. Já as plantas semideterminadas, atingem uma altura máxima de 0,9 a 1,5 m, e sua característica é que os principais conjuntos da fruta amadurecem juntos, mas a planta também continua a produzir fruto adicional. Por fim, o tipo determinado, chamado tomateiro arbusto, principalmente rasteiro, tem uma configuração de floração e frutos relativamente concentrada durando cerca de três semanas apenas. Neste período, o crescimento vegetativo é contínuo e a maioria das frutas de cultivares determinadas amadurece em um período relativamente curto e, por isso, são adequados para a colheita mecânica (BATTILANI

et al., 2012). Já o cultivo do tomateiro estaqueado é o mais tecnificado, no entanto, exige também muito trabalho. O amarriado dos ramos, a desbrota e outras operações são bastante dispendiosas, mas o sistema tutorado garante a colheita de produto de qualidade para mesa. Em períodos de menor oferta desse tipo - de maio a setembro - é comum a entrada de tomate tipo industrial no mercado de produto para mesa (DUSI et al., 1993).

3.1.6. Consumo de água do tomateiro

Segundo Marouelli et al. (2012) a quantidade total de água necessária para a irrigação do tomateiro, que depende das condições climáticas, do sistema de irrigação e da cultivar, dentre outros fatores, varia entre 300 a 650 mm.

No entanto, segundo Battilani et al. (2012), o cultivo do tomateiro consome entre 400-800 mm de água na emergência/transplante até colheita, dependendo do clima, tipo de planta, solo, irrigação e manejo da cultura. Ainda de acordo com os autores, os tomateiros podem tolerar a seca em alguns graus. Portanto, os níveis de umidade do solo podem chegar a 50 por cento do total de água disponível (TAD) sem perdas de rendimento após concluir o desenvolvimento do dossel. É importante manter os níveis de umidade do solo adequados no início do ciclo de vida, no transplantio, jus ocasião da emissão da primeira flor até o ajuste completo da fruta.

Ainda de acordo com os autores pode-se encerrar a irrigação algumas semanas antes da colheita, dependendo do armazenamento de água do solo e da expectativa de chuvas. Durante o período de pico de crescimento, as médias de uso de água chegam ao máximo de 4-7 mm/dia em um clima subúmido, podendo chegar a 8-9 mm/dia em áreas mais áridas.

3.1.7. A resposta ao estresse

A deficiência hídrica afeta processos bioquímicos e fisiológicos, e induz respostas metabólica e fisiológica, como o fechamento estomático e declínio na taxa de crescimento (LARCHER, 2006). Segundo Blum (2005) a perda de água pode reduzir o potencial hídrico das plantas, causando diminuição na turgescência, condutância estomática, fotossíntese e, finalmente, menores crescimento e produtividade. De acordo com Battilani et al. (2012) o status elevado de água estimula o crescimento vegetativo e, geralmente, leva à queda de flores e frutos recém-definidos no início da temporada. Por outro lado, o estresse ligeiro a moderado de água no início da temporada, se durar muitos dias, pode resultar em um dossel notavelmente menor

e, consequentemente, uma menor produção de biomassa, resultante da diminuição da captura de radiação.

O tomateiro é resistente à seca, porém o uso excessivo de água na irrigação pode reduzir a qualidade dos frutos, além de causar acúmulo de nitrato no fruto. Temperaturas baixas, se persistirem em muitos dias, causam a redução da taxa de iniciação da folha e do fardo, e a planta produz folhas mais espessas de modo que eles interceptam menos luz. A exposição a temperaturas elevadas provoca uma redução do número de grãos de pólen e prejudica a sua viabilidade e a capacidade de germinação, que afeta consideravelmente a frutificação. Já em condições de umidade elevada, combinada com temperaturas acima de 27 °C, também afeta a germinação do pólen, resultando numa redução de rendimento. O tomateiro é uma cultura sensível às geadas. Por fim, a cultura é moderadamente sensível à salinidade (BATTILANI et al., 2012).

3.1.8. Irrigação e necessidade hídrica da cultura do tomateiro

Em regiões de alta umidade e ótima disponibilidade dos recursos hídricos, o sistema por sulcos pode ser o mais utilizado para o tomateiro. De acordo com Dusi et al. (1993) embora exija a sistematização do solo para sua implantação, este tipo de irrigação reduz a possibilidade de ocorrência de doenças fúngicas quando comparado com o sistema de aspersão. Ainda de acordo com os autores, com irrigações menos frequentes no estágio de crescimento das plantas, suas raízes se desenvolvem melhor. Já durante a fase de floração, frutificação e maturação, irrigações leves e frequentes favorecem o desenvolvimento do fruto e aumentam-lhe o teor de suco.

O tomateiro é exigente quanto a regularidade de irrigação, sendo o excesso de umidade altamente prejudicial. A irrigação por gotejamento é o método mais utilizado (praticamente exclusivo), propiciando maior eficiência de aplicação, facilitando o manejo integrado de pragas, além de otimizar a aplicação de fertilizantes através da fertirrigação (MAROUELLI et al., 2001).

A irrigação deve ser suficiente para manter úmida a camada de solo explorada pelo sistema radicular do tomateiro que, de modo geral, atinge até 40 cm de profundidade (DUSI et al., 1993).

A necessidade hídrica da cultura do tomateiro, como a maioria das culturas, pode ser determinada a partir da estimativa ou medição da evapotranspiração que ocorre na área de

cultivo (ETc), variando conforme a espécie cultivada, o estágio e condições de desenvolvimento da cultura além do clima do ambiente.

3.1.9. Pesquisas realizadas com o tomate

Mediante inúmeros objetivos de pesquisa do tomateiro, diversos pesquisadores estudam o tomateiro em busca de informações úteis em todas as finalidades estabelecidas, buscando conhecer não somente sua estrutura, mas também otimizar produções, minimizar custos, estudar o comportamento juntamente com variáveis meteorológicas, modelagem, dentre outras finalidades:

Ferreira et al. (2006) quantificaram as perdas na pós-colheita para tomate de mesa, avaliando-se o efeito do manuseio e transporte na qualidade física dos frutos, cultivar Romana, nas etapas de colheita, pesagem e transporte para o galpão de beneficiamento. Observaram um aumento progressivo na perda de peso e incidência de danos físicos, bem como nas perdas pós-colheita após armazenamento. Comparando-se frutos avaliados na colheita e amostrados no galpão de beneficiamento, notaram que o manuseio e o transporte foram responsáveis por aumento de 6,6% na incidência de danos físicos e 1,93% na perda de peso após armazenamento. As maiores percentagens de frutos descartados foram observadas durante o transporte em caixas plásticas, devido a danos físicos superficiais causados, principalmente, pela compressão de um fruto no outro.

Ferreira et al. (2010) objetivaram avaliar a qualidade pós-colheita de frutos de tomate de mesa de diferentes sistemas de cultivos. Uma das conclusões foi que tempo de armazenamento em temperatura ambiente é de 13 dias para o tomate convencional e de 14 dias para o tomate orgânico. Os autores ressaltam que o ideal é consumir quando atinge a coloração vermelha, maior firmeza ao toque, melhor textura, melhor succulência e baixa contagem de bolores e leveduras que ocorre aproximadamente em 8 dias para o tomate orgânico e em 10 dias para o tomate convencional.

Malheiros et al. (2012) avaliaram o uso de doses de efluente oriundo de indústria de sorvete, na cultura do tomateiro cereja em relação ao consumo hídrico e no desenvolvimento vegetativo em sistema hidropônico. Uma das conclusões foi que o aumento das doses de efluente tratado promoveu redução linear no consumo hídrico das plantas.

Medeiros et al. (2012) avaliaram o efeito da salinidade do solo e do manejo da fertirrigação sob a produtividade e eficiência de uso da água do tomateiro, cultivado em solo franco argiloso e em casa de vegetação. Uma das conclusões dos autores foi que as maiores

produtividades e eficiências do uso foram obtidos para o manejo de fertirrigação alternativo (M2) sob condições de baixa salinidade do solo.

Reis et al. (2013) determinaram ao longo do ciclo da cultura do tomateiro, a relação entre o índice de área foliar e a produtividade e, ao final do ciclo, os componentes de produção do tomateiro, em ambiente protegido. Uma das conclusões foi que é possível determinar, em ambiente protegido, o índice de área foliar da cultura do tomateiro considerando-se os dias após o transplantio.

Soares et al. (2013) avaliaram o crescimento e as características químicas do fruto do tomateiro irrigado com diferentes lâminas de irrigação em diferentes fases fenológicas sob condições de ambiente protegido. Uma das conclusões foi que lâminas crescentes de água promovem, nas fases de floração e frutificação, aumento na taxa de crescimento absoluto em altura de planta.

Guilherme et al. (2014) avaliaram aspectos sensoriais e características físico-químicas de dois genótipos não comerciais de tomate cereja, CH152 e CLN1561, comparando-os ao genótipo Carolina, todos cultivados organicamente. Concluíram que ambas as variedades testadas produzem frutos de alta qualidade sensorial e físico-química tendo potencial para serem exploradas comercialmente.

Silva et al. (2014) avaliaram aspectos agronômicos do tomateiro “Caline IPA 6” cultivado sob diferentes taxas de reposição hídrica em área do semiárido paraibano. Os autores concluíram que as lâminas de irrigação influenciaram significativamente nas características analisadas, sendo constatado que os aspectos agronômicos do tomateiro “Caline IPA 6” são afetados positivamente com lâminas de irrigação acima de 100% da necessidade da cultura. Já a variação na reposição hídrica do consumo do tomateiro afetou os componentes de produção com maior intensidade no número de frutos e na produção por planta.

Viol et al. (2017) avaliaram o efeito da aplicação de água com diferentes níveis de salinidade na produção do tomate cultivado em ambiente protegido, localizado no Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG. Uma das conclusões foi que a produção comercial foi mais afetada pela salinidade da água do que a produção total.

3.2. Estudo da umidade do solo por meio de sondas capacitivas

No estudo das condições necessárias ao acompanhamento de uma determinada cultura, uma variável de extrema importância é, sem dúvidas, a umidade do solo. Ela não somente

influencia como também é grande responsável pelo prosseguimento de todas as etapas na vida de uma planta. De acordo com Tavares (2016) em uma superfície cultivada, o conhecimento acerca do consumo de água nos diversos subperíodos ou etapas de desenvolvimento da planta viabiliza o manejo adequado dos recursos hídricos disponíveis numa região. Esses recursos se encontram escassos em determinadas áreas em que a agricultura irrigada se faz necessária. Por isso, é fundamental estudar e conhecer o recurso hídrico para a planta, de modo a minimizar as dificuldades enfrentadas pelas culturas.

A umidade do solo é estudada para diferentes propósitos e agronomicamente, por exemplo, é importante para determinação do balanço hídrico, bem como para conhecer o momento adequado para irrigar, preparar ou semear no solo (RAMOS et al., 2014). De acordo com Buske (2013), o conhecimento da umidade do solo é de fundamental importância, pois indica em que condição hídrica encontra-se o mesmo, podendo ajudar na redução dos gastos com água e energia elétrica, haja vista que o monitoramento da umidade do solo possibilita aplicações controladas e pontuais de água, respondendo o quanto e quando irrigar em função das necessidades hídricas das culturas, sendo cada vez mais essencial na agricultura.

Desde muito tempo, diversos pesquisadores estudaram e definiram métodos de obtenção da umidade do solo, classificando entre métodos diretos e indiretos. Segundo Souza et al. (2013), nos métodos diretos como o gravimétrico, considerado padrão, é trabalhoso e requer tempo de resposta de pelo menos 24 horas para obtenção dos resultados, não possibilitando a repetição. Já as técnicas indiretas como, por exemplo, Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e a Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) consistem em alternativas para quantificação do conteúdo de água do solo, com vistas ao fornecimento de leituras precisas e rápidas em diferentes profundidades analisadas.

Segundo Ramos et al. (2014) a desvantagem do uso contínuo da gravimetria é que como se trata de um método invasivo-destrutivo, ou seja, além de ocasionar perfurações no solo, também demanda tempo e material (estufa a 105°C por 24 ou 48 horas), além disso, pode inviabilizar medidas em curto intervalo de tempo se a área cultivada for pequena. Ainda de acordo com os autores, entre os métodos indiretos, destacam-se: os tensiométricos (tensiômetros), os radiométricos (sonda de nêutron), os de resistência elétrica (bloco de gesso), os de reflectometria no domínio do tempo (TDR), os de capacidade ou reflectometria no domínio da frequência - FDR (sonda de capacidade) e os de reflexão ou emissão de radiação (sensoriamento remoto).

A medida da umidade do solo obtida pela sonda FDR, também conhecida por sonda de capacidade, baseia-se em um par de eletrodos ou placas metálicas condutoras dispostas em

paralelo e separadas por material isolante constituindo-se um capacitor. Quando ativado, a matriz solo-água-ar forma o meio dielétrico deste capacitor. A capacitância aumenta com o aumento do número de moléculas de água livre e com os dipolos respondendo ao campo elétrico criado pelo capacitor (PALTINEANU & STARR, 1997).

No monitoramento da umidade do solo por meio de sondas, apesar delas apresentarem uma calibração universal do fabricante, no entanto, para que ocorra uma melhor adequação do equipamento na estimativa do conteúdo de água no solo, é importante destacar a necessidade de realizar a calibração local, sabendo que a calibração em campo é trabalhosa e tem que ser realizada com cuidado para obtenção de resultados com boa precisão (SILVA et al., 2007).

Quando se fala em reflectometria no domínio do tempo (TDR) ou reflectometria no domínio da frequência (FDR), diversos pesquisadores utilizaram a sonda no estudo da umidade do solo:

Souza et al. (2013) avaliaram e calibraram sondas FDR e TDR para estimativa do conteúdo de água do solo em Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média e Nitossolo Vermelho de textura argilosa em condições de laboratório. Os resultados obtidos pelos autores revelaram que os métodos indiretos podem substituir o método padrão quando a acurácia não for essencial, mostrando-se aceitáveis para monitoramento da água no solo.

Primo et al. (2015) realizaram a calibração de três sondas capacitivas, visando utilizá-las na definição de funções físico-hídricas e na análise da variação espacial e temporal do conteúdo (θ) e do armazenamento de água, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, cultivado com três clones de palma forrageira, no semiárido pernambucano. Uma das conclusões foi que as sondas capacitivas (modelo Diviner@2000) apresentaram bons desempenhos na estimativa do conteúdo de água do solo por meio de medidas de frequência relativa, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, do semiárido pernambucano, quando comparados com os resultados relatados na literatura.

Demais pesquisas podem ser encontradas em Silva et al. (2007), Kaiser et al. (2010), Ramos et al. (2014), Tavares (2016), dentre outros.

3.3. Balanço hídrico

O balanço hídrico é de fundamental importância em diversos estudos de uma região, por exemplo, identificação de locais favoráveis a determinado tipo de cultura, classificação climática, etc. Diversos autores definem balanço hídrico como sendo a contabilidade hídrica do

solo, ou seja, o cômputo de todos os ganhos e perdas de água, juntamente com o seu armazenamento, que se verificam no solo ou bacia considerada (FREITAS, 2009).

Segundo Ometto (1981) o processo de entrada de água é realizado por meio da precipitação pluvial ou irrigação. A água cedida à superfície pela precipitação é função de sua intensidade, duração, além da textura do solo, profundidade da camada impermeável e inclinação da superfície, em que a intensidade e inclinação podem ser fatores limitantes no molhamento do perfil: se a inclinação do terreno for muito acentuada e a intensidade da precipitação for elevada, a duração da chuva deixa de ser fator de importância, pois neste caso, o que predomina será o deflúvio superficial (escoamento superficial); já quando a declinação do terreno for considerada suave e a intensidade da precipitação baixa, a duração da precipitação passa a ser um fator primordial no molhamento do perfil.

Têm-se no balanço hídrico, integrantes como: a precipitação (Pr) e/ou irrigação (I), que são os grandes fornecedores de água no solo, o escoamento superficial (R) que seria a água que não entrou no solo, à quantidade de água que ficou armazenada neste mesmo solo (ARM), a drenagem profunda (Dp) que é aquela parte que percolou abaixo do perfil do solo e, por fim, a ação simultânea da evaporação e da transpiração das plantas (considerando sempre esse solo vegetado) que é denominada evapotranspiração (ET). A equação composta por essas variáveis é construída de modo que todos somados correspondem ao valor zero, contribuindo para o raciocínio do balanço hídrico.

Considerando em escalas, pode-se dizer que na escala macro o balanço hídrico é o próprio ciclo hidrológico, em que o resultado fornecerá água disponível, de uma forma geral, no sistema (rios, lagos, vegetação, solo, oceanos, etc.), caso da biosfera.

Quando se refere à escala intermediária, representada por uma microbacia hidrográfica, o balanço hídrico resulta na vazão de água (Q) desse sistema, onde num determinado período considerado, tem-se duas situações distintas: a vazão (Q) aumenta à medida que ocorrem períodos em que a chuva é maior do que a demanda atmosférica por vapor d'água; e ela diminui quando num período, a chuva é inferior a demanda atmosférica por vapor d'água.

Por fim, a escala local em caso de cultura, em que determina-se através do balanço hídrico a variação do armazenamento de água do solo e, por consequência, sua disponibilidade naquele local. Com isso podem-se determinar alguns parâmetros de fundamental importância para as culturas, de maneira geral, buscando sempre o melhor aproveitamento dessas culturas, ou seja, o nível de seu rendimento.

Na prática, efetuar diretamente o balanço hídrico não é uma tarefa simples e dependendo do local, às vezes nem sempre possível. Geralmente exige o emprego de equipamentos

sofisticados e de mão-de-obra especializada, muitas vezes tornando, inacessível ao agricultor. Estudos que levam em conta todos os fluxos envolvidos neste processo ficam restritos a pequenas áreas e se destinam à verificação da validade de modelos matemáticos, desenvolvidos para simulação deste balanço hídrico. Já os métodos indiretos, desenvolvidos a partir de variáveis meteorológicas, ainda hoje apenas se aproximam da realidade física do local, pois sabe-se que é bastante complicada a obtenção desse balanço hídrico de maneira fácil e precisa (FREITAS, 2009).

3.4. Coeficiente e evapotranspiração de uma cultura

A evapotranspiração da cultura (ETc) pode ser obtida através da multiplicação da evapotranspiração de referência (ETo) por um coeficiente de cultura (Kc) (ALLEN et al., 1998).

A maioria dos efeitos das várias condições climáticas são incorporadas a estimativa da ETo. Logo, como a ETo representa um índice de demanda climática, o Kc varia predominantemente com as características específicas das culturas e apenas de forma limitada com o clima. Isto permite a transferência de valores padrão para Kc entre locais e climas, sendo este fato o principal motivo para a aceitação global e a utilidade da abordagem do coeficiente de cultura e os fatores do Kc desenvolvidos em estudos realizados anteriormente. O coeficiente de cultura (Kc), basicamente é a relação entre a evapotranspiração da cultura (ETc) e a de referência (ETo), representando uma integração dos efeitos de quatro características principais que distinguem a cultura em uma grama de referência, sendo elas: altura da cultura, albedo (reflectância) da superfície da cultura-solo, resistência do dossel e evaporação do solo, especialmente o solo exposto.

3.4.1. Fatores determinantes no coeficiente de cultura

O coeficiente de cultura inclui o efeito das características que diferenciam uma cultura num campo típico com grama de referência, que apresentam uma aparência constante e uma total cobertura do solo. Consequentemente, as diferentes culturas terão diferentes coeficientes de cultura (Kc). As características de mudanças da cultura sobre a estação de crescimento também afetam o Kc. Finalmente, como a evaporação é uma parte integrada da evapotranspiração das culturas, as condições que afetam a evaporação do solo também afetarão os valores do Kc, destacando-se:

3.4.1.1. Tipo de cultura

Os espaçamentos internos entre as plantas, maior altura do dossel e aspereza de muitas culturas agrícolas desenvolvidas causam K_c maiores do que 1, sendo o K_c , muitas vezes, de 5 a 10% maiores do que o de referência ($K_c = 1.0$) e até 15 a 20% maior para algumas culturas altas como o milho, sorgo ou cana-de-açúcar.

3.4.1.2. Clima

Para o clima destacam-se as variações no vento que alteram a resistência aerodinâmica das culturas e, portanto, seus coeficientes de cultura, especialmente para aquelas culturas que são substancialmente mais altas do que uma hipotética grama de referência. O efeito da diferença de propriedades aerodinâmicas entre culturas em superfície em grama de referência e culturas agrícolas não é apenas de culturas específicas. Também varia com as condições climáticas e a altura da cultura, pois propriedades aerodinâmicas são maiores para muitas culturas agrícolas em comparação com a grama de referência. A razão entre ET_c e ET_o , ou seja, K_c , para muitas culturas aumenta com o aumento da velocidade do vento e com a diminuição da umidade relativa do ar. Condições de maior velocidade do vento e climas mais áridos terão valores mais altos para K_c . Condições de baixa velocidade do vento e climas mais úmidos terão valores mais baixos para K_c (ALLEN et al., 1998).

3.4.1.3. Evaporação do solo

De acordo com Allen et al. (1998) diferenças na evaporação do solo e transpiração da cultura entre culturas cultivadas em superfície de referência estão integradas dentro do coeficiente de cultura. O coeficiente K_c para as culturas de cobertura total reflete principalmente diferenças na transpiração e a contribuição da evaporação do solo é relativamente pequena. Após ocorrer a precipitação e/ou irrigação, o efeito desta evaporação é predominante quando a cultura é pequena com pouca sombra no chão. Para tais condições de baixa cobertura, o coeficiente K_c é determinado em grande parte pela frequência com que a superfície do solo é molhada. Quando o solo está úmido durante a maior parte do tempo da irrigação ou chuva, a evaporação da superfície do solo é considerável e o K_c pode ser superior a 1. Por outro lado, quando a superfície do solo está seca, a evaporação é restrita e o K_c será pequeno e pode ficar um valor tão baixo quanto 0,1 (Figura 1).

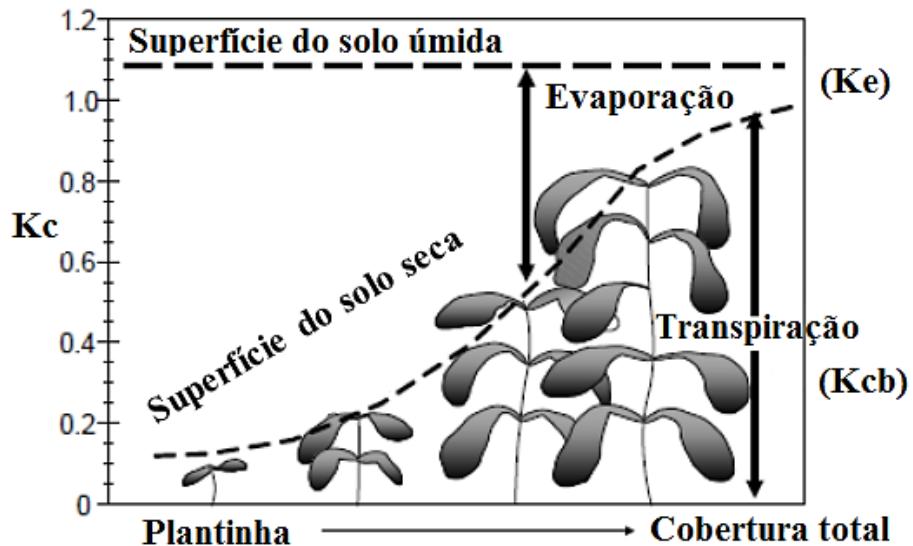


Figura 1. O efeito da evaporação em Kc. A linha horizontal representa o Kc quando a superfície do solo é mantida constantemente úmida. A linha curva corresponde ao Kc quando a superfície do solo é mantida seca, porém a cultura recebe água suficiente para manter a transpiração total

Fonte: Allen et al. (1998)

3.4.2. Estágios de crescimento das culturas

Devido a diferenças na evapotranspiração durante os vários estágios de crescimento, o Kc para uma determinada cultura irá variar ao longo do período de crescimento. O período de crescimento pode ser dividido em quatro distintos estágios de crescimento: inicial, desenvolvimento da cultura, intermediário e final.

3.4.2.1. Estágio inicial

O estágio inicial decorre da data do plantio até aproximadamente 10% de cobertura do solo. Durante o período inicial, a área foliar é pequena, e a evapotranspiração é predominantemente sob a forma de evaporação do solo. Portanto, o Kc durante o período inicial (Kc ini) é grande quando o solo está úmido devido a irrigação e chuvas e, se torna baixo, quando a superfície do solo está seca.

3.4.2.2. Estágio de desenvolvimento das culturas

O estágio de desenvolvimento das culturas decorre da cobertura do solo de 10% até a cobertura total efetiva da cultura estudada. Uma maneira de estimar a ocorrência de cobertura total efetiva é quando o índice de área foliar (IAF) atinge valor três (ALLEN et al., 1998). IAF

é definida como a área total média de folhas (um lado) por unidade de área de superfície do chão.

3.4.2.3. Estágio intermediário

O estágio intermediário decorre da cobertura total efetiva até o início da maturidade da cultura. O início da maturidade é muitas vezes indicado pelo início do envelhecimento, amarelecimento ou senescência das folhas, queda de folhas ou o escurecimento da fruta na medida em que a evapotranspiração da cultura é reduzida em relação a de referência ETo. No estágio intermediário, Kc atinge seu valor máximo.

3.4.2.4. Estágio final

O estágio final ocorre desde o início da maturidade da cultura ou senescência completa. Presume-se o cálculo para Kc e ETc ao fim quando a cultura é colhida, seca naturalmente, atinge a senescência completa ou experiências de queda de folha.

3.4.3. Evapotranspiração da cultura (ETc)

Evapotranspiração da cultura é determinado multiplicando ETo pelo Kc, um coeficiente que expressa a diferença na evapotranspiração entre a cultura cultivada e a superfície com grama de referência. A diferença pode ser combinada em um único coeficiente, ou ele pode ser dividido em dois fatores, descrevendo separadamente as diferenças de evaporação e transpiração entre ambas as superfícies. A seleção da abordagem depende da finalidade do cálculo, a precisão exigida, os dados climáticos disponíveis e o espaço de tempo com a qual os cálculos são executados (ALLEN et al., 1998).

3.4.4. Coeficientes de cultura simples e dual

3.4.4.1. Coeficiente de cultura simples (Kc)

Na abordagem do coeficiente de cultura simples, o efeito da transpiração da cultura e da evaporação do solo é combinado em um único coeficiente de cultura (Kc). O coeficiente

integra as diferenças na evaporação do solo e taxa de transpiração das culturas entre a cultura cultivada e a superfície com grama de referência.

3.4.4.2. Coeficiente de cultura dual (Kcb + Ke)

Na abordagem do coeficiente dual de cultura, os efeitos da evaporação de água no solo e transpiração das culturas são determinados separadamente. Dois coeficientes são usados: o coeficiente de cultura basal (Kcb) que descreve a transpiração da planta e o coeficiente de evaporação de água do solo (Ke) que descreve a evaporação na superfície do solo, cujo Kc se torna:

$$Kc = Kcb + Ke \quad (1)$$

em que:

Kcb: Coeficiente de cultura basal;

Ke: Coeficiente de evaporação de água no solo.

3.4.5. Curva do coeficiente de cultura

Esta curva representa as mudanças no coeficiente de cultura ao longo do comprimento da estação de crescimento. A forma da curva representa as mudanças na vegetação e cobertura do solo durante o desenvolvimento da planta e maturação que afetam a relação de ETc e ETo. A partir da curva do Kc, a ETc pode ser derivada para qualquer período dentro da estação de crescimento (ALLEN et al., 1998).

3.4.6. Pesquisas realizadas com o coeficiente de cultura Kc

Visto a necessidade em determinar o coeficiente de cultura, diversos autores determinaram este coeficiente para diferentes culturas: Franke e Konig (1994) determinaram o coeficiente de cultura (Kc) para a cultura da batata (*Solanum tuberosum* L.), sob irrigação por aspersão, bem como a evapotranspiração total no ciclo, para as condições edafoclimáticas de Santa Maria, RS. Dentre os resultados destacam-se que os valores encontrados dos coeficientes

de cultura foram: 0,51; 1,43; 1,14; 1,01 e 0,89 nos subperíodos P2, P3, P4, P5 e P6, respectivamente.

Teixeira et al. (1999) determinaram o consumo hídrico e o coeficiente de cultura para diferentes fases fenológicas da cultura da videira, nas condições edafoclimáticas da região do Submédio São Francisco. Através desta pesquisa concluíram que os valores do coeficiente de cultura variaram de 0,65 a 1,15, de acordo com o método de cálculo da ETo, porém se mostraram superiores aos recomendados pela FAO.

Netto et al. (2000) estimaram as necessidades hídricas da videira (*Vitis vinifera* L.), cv. Itália, sob as condições edafoclimáticas da Região do Submédio São Francisco. A parte experimental foi conduzida no campo experimental de Bebedouro da Embrapa-Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido, no município de Petrolina, PE, durante o período de maio a agosto de 1996. Através dos resultados destacam-se: os valores do Kc variaram de 0,50 a 0,74. Determinaram também uma curva característica do Kc para o ciclo vegetativo da videira, a qual permitiu obter o Kc diário em função dos dias após a poda.

Villa Nova et al. (2002) com base em pesquisa realizada no cafezal do Departamento de Produção Vegetal da ESALQ, Universidade de São Paulo, utilizando a cultivar Mundo Novo IAC 388-17, enxertada na cultivar Apoatã IAC 2258, plantada no espaçamento de 2,5 m x 1,0 m ($4.000 \text{ plantas.ha}^{-1}$), propuseram um método para a estimativa do coeficiente de cultura (Kc) do café. Dos resultados obtidos, destaca-se que em comparação com os dados de Kc para café indicados na literatura, o método proporcionou resultados consistentes, com a vantagem de permitir simulações para diferentes densidades de plantas.

Oliveira et al. (2003) obtiveram-se coeficientes de cultura (Kc) da cenoura, variedade Nantes, explorada nas condições edafoclimáticas da região do Alto Paranaíba, no Estado de Minas Gerais, seguindo-se a metodologia proposta no Boletim FAO 56, objetivando-se o manejo racional da água em áreas irrigadas por pivô central. Os valores de Kc obtidos foram 1,15, 1,12, 1,12 e 1,10 para os estádios de desenvolvimento inicial, crescimento da cultura, intermediário e final, respectivamente.

Teixeira et al. (2003) obtiveram e compararam valores de coeficiente de cultura (Kc) no decorrer das fases fenológicas da goiabeira irrigada em Petrolina-PE, com a utilização de estações agrometeorológicas convencionais e automáticas. Destaca-se que o Kc apresentou valores entre 0,75 a 0,93 e de 0,61 a 0,84, quando foram usadas as estações convencional e automática, respectivamente.

Montenegro et al. (2008) estimaram a evapotranspiração e os coeficientes de cultivo da bananeira na região litorânea do Estado do Ceará. O estudo foi conduzido no Campo

Experimental do Curu, pertencente à Embrapa Agroindústria Tropical, latitude 03° 28' 47" S, longitude 39° 09' 47" W e altitude de 31 m, localizado no município de Paraipaba-CE. Dos resultados obtidos pelos autores destaca-se que os valores médios de Kc da bananeira observados nos estádios foram: 0,60 para o inicial, 1,05 para o florescimento e desenvolvimento dos frutos no 1º ciclo, 0,86 para o crescimento vegetativo no 2º ciclo e 1,05 para o florescimento e desenvolvimento dos frutos no 2º ciclo.

Mendonça et al. (2007) determinaram os valores de Kc para as diferentes fases fenológicas do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar em lançamento UENF-47, através da utilização de um lisímetro de pesagem e compararam com os valores propostos pela FAO 56. Concluíram que as equações de ajustamento propostas por Allen et al. (1998) se mostraram eficientes para a correção e ajustamento dos coeficientes culturais obtidos neste experimento e que os coeficientes culturais das fases 3 (Kc méd) e 4 (Kc fim) sugeridos também por Allen et al. (1998) se ajustaram bem às condições de cultivo do feijoeiro cultivado no período de outono/inverno, em Campos dos Goytacazes, RJ.

Barboza Júnior et al. (2008) determinaram a evapotranspiração de uma planta adulta de limeira-ácida ‘Tahiti’ (*Citrus latifolia* Tan.) e o coeficiente de cultivo (Kc) no período seco (outono-inverno), utilizando a técnica de lisimetria de pesagem. O experimento foi realizado na ESALQ/USP em Piracicaba-SP, em área irrigada por gotejamento, com plantas espaçadas de 7 x 4 m, sendo cada planta atendida por quatro pontos de molhamento no solo, distribuídos de forma equidistantes entre si. Dos resultados obtidos, destacam-se que durante o período de estudo, o Kc variou entre 0,82 e 1,18 e a ETc variou entre 1,2 e 5,6.

Lopes et al. (2011) determinaram a lâmina total de água consumida em determinado ciclo do alecrim-pimenta, os coeficientes da cultura ao longo deste período do ciclo e a eficiência do uso da água em relação à sua massa fresca e ao óleo essencial, bem como a produção de biomassa e o óleo essencial, sob regime de irrigação, numa região em Montes Claros, MG. Dos resultados destaca-se que os coeficientes de cultura (Kc) médios determinados em todo o ciclo da cultura, variaram de 0,98 na fase inicial, 1,20 no desenvolvimento vegetativo e 1,52 no florescimento.

Bezerra et al. (2012) estimaram a evapotranspiração - ETc e determinaram a curva do coeficiente de cultura - Kc do algodoeiro irrigado através do Surface Energy Balance Algorithm for Land - SEBAL com imagens orbitais TM - Landsat 5. Dentre os resultados destacam-se que a ETc e o Kc obtidos foram, respectivamente: 1,0 a 5,0 mm dia⁻¹ e 0,65 no período de desenvolvimento (7 e 70 DAS); >6 mm dia⁻¹ e 1,18 durante a floração e formação dos capulhos e 2 mm dia⁻¹ e 0,66 no fim do ciclo.

Silva et al. (2012) determinaram o requerimento hídrico e o coeficiente de cultura (Kc) da cana-de-açúcar irrigada durante o ciclo de soca, variedade RB 92-579, na região semiárida do Submédio do Vale do São Francisco. Dentre os resultados destacam-se que o requerimento hídrico total da cana-de-açúcar foi de 1710 mm, e o Kc atingiu o valor médio de 1,10 na fase de crescimento máximo. Já as equações de estimativa do Kc mensal, tendo graus dias acumulados e dias após o corte como variáveis independentes apresentaram ótimos ajustes ($R^2 \sim 0,95$ e 0,98) e consideraram a redução nos valores de Kc devida ao tombamento da cultura.

No tocante ao assunto abordado com o tomateiro, Hanson e May (2006) tiveram como objetivo determinar a ETc do tomateiro para irrigação por gotejamento em campos comerciais e, em seguida, calcular o coeficiente de cultura com os dados de ETc e ETo para o lado Oeste do Vale de San Joaquin da Califórnia (EUA). Dos resultados obtidos, destaca-se que os coeficientes médios de cultura variaram de 0,19 quando a cultura estava com apenas 10% da cobertura do dossel, até o valor de 1,08 quando este dossel atingiu cobertura superior a 90%.

Duarte et al. (2010) determinaram o consumo hídrico do tomateiro com adubação orgânica e avaliaram as estimativas da evapotranspiração e do coeficiente de cultura (Kc) em ambiente protegido, com o uso dos métodos do Tanque Classe A, Radiação Solar, Penman e Penman-Monteith. O experimento foi conduzido de setembro de 2004 a janeiro de 2005, no Campus da Universidade Federal de Pelotas. Dentre os resultados destaca-se que a evapotranspiração de referência apresentou valores próximos da evapotranspiração da cultura ao longo do período de cultivo com o uso dos métodos do tanque Classe A, Radiação solar e Penman, mantendo o Kc médio de 0,95, 1,02 e 1,01, respectivamente, enquanto que para o método de Penman-Monteith o Kc médio foi de 1,41.

Santana et al. (2011) determinaram os coeficientes de cultura (Kc) do tomateiro irrigado para a região de Uberaba, MG. Concluíram que os valores de Kc para as fases inicial, desenvolvimento, intermediário, final e colheita foram, respectivamente, de 0,37, 0,72, 1,03, 1,10 e 0,75.

Sales (2016) estimou a evapotranspiração atual da cultura de dois híbridos de tomateiro para o processamento industrial, N901 e H1308, e os seus respectivos coeficientes de cultura (Kc) pelo modelo de balanço de energia SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) utilizando imagens do satélite Landsat 8 OLI/TIRS, na órbita 221/72 e 222/71, e comparou com o tradicional método micrometeorológico utilizando evapotranspiração de referência (ETo Penman-Monteith), com os Kcs recomendados pela FAO 56 e EMBRAPA. O estudo foi realizado na Fazenda cabeceira do Piracanjuba, no município de Silvânia-GO, no período de maio a agosto de 2015, em solo argiloso com preparo convencional. Dos resultados

encontrados, destaca-se que os K_{cs} estimados pelo método do SAFER apresentaram significante correlação com os métodos FAO 56 e Embrapa (FAO 56, $R^2 = 0,98$; Embrapa, $R^2 = 0,95$).

3.5. Os modelos agrícolas

Modelos de simulação de culturas são usados em nível de campo para estimar o potencial produtivo da cultura, otimizar a gestão e a eficiência do uso da água. Os modelos têm a capacidade de prever a produtividade sem necessidade de calibração específica de parâmetros internos associados com processos fisiológicos fundamentais (MORELL et al., 2016).

Os modelos são geralmente definidos como simplificação ou abstração de um sistema real (LOOMIS et al., 1979). Este é particularmente o caso para os modelos de sistemas biológicos como as culturas, onde a realidade é composta por um grande número de componentes e processos interagindo sobre uma escala larga dos níveis organizacionais (SINCLAIR e SELIGMAN, 1996). Dada complexidade deste sistema e ao estado incompleto do conhecimento presente, torna-se impossível representar plenamente o sistema em termos matemáticos e, por isto, os modelos de cultura apresentam simplificações da realidade (ALENCAR, 2014).

Um modelo de cultura especificamente pode ser descrito como um sistema quantitativo para prever o crescimento, o desenvolvimento e a produção de certa cultura, dado o conjunto de características genéticas e variáveis ambientais relevantes (MONTEITH, 1996). Ainda de acordo com o autor, eles são classificados como empíricos ou mecanísticos, em que os mecanísticos requerem que os processos simulados descrevam o sistema em termos dos mecanismos físicos, químicos e biológicos e os modelos empíricos consistem em analisar dados experimentais realizando algumas análises dos mesmos e ajustando equações matemáticas que possam representar o comportamento dos dados observados. Os modelos mecanísticos, devido a sua concepção, podem ser utilizados para explorar uma gama extensiva de tratamentos em locais diferentes que não seria possível com experimentação de campo, devido ao custo e o tempo requerido (MONTEITH, 1996). Muitos modelos de culturas ou partes de modelos de culturas foram construídos para ajudar a compreender o funcionamento de uma parte de um sistema de cultivo agronômico. Além de compreender várias partes de sistemas agronômicos, o modelo deseja ver o que pode ser esperado para ocorrer se alguma alteração for feita no sistema. Os testes de campo são longos e caros, especialmente com o número elevado de

tratamentos, mas podem ser pré-avaliados por um modelo que aperfeiçoe os testes de campo e reduza os custos totais (WHISLER et al., 1986)

3.5.1. O modelo AquaCrop

No início, os principais modelos de culturas existentes apresentaram uma complexidade substancial para a maioria dos usuários finais. Além disso, eles precisavam de uma grande quantidade de variáveis e parâmetros de entrada, nem sempre facilmente disponíveis para a grande diversidade de culturas e locais ao redor do mundo. Por fim, a pouca transparência e simplicidade da estrutura do modelo para o usuário final foram considerados uma forte restrição. Para localizar todas estas preocupações e na tentativa de alcançar um melhor equilíbrio entre precisão, simplicidade e robustez, a FAO desenvolveu um novo modelo de cultura, denominado AquaCrop.

O AquaCrop é um modelo de crescimento de culturas desenvolvido pela FAO, Land and Water Division, que simula o rendimento de culturas herbáceas em resposta a água, se tornando adequado para situações em que essa água é um fator limitante chave na produção das culturas. Este modelo foi criado buscando o equilíbrio ótimo entre simplicidade, precisão e robustez, tão importantes no estudo que se tem relações entre os parâmetros de desenvolvimento de uma planta e a demanda hídrica envolvida em todo o seu processo de desenvolvimento.

Diversos pesquisadores em todo mundo estudam o comportamento de culturas por meio da modelagem. Dentre os modelos utilizados, vem se destacando o AquaCrop, cujos resultados e simplicidade de aplicação tem despertado o interesse em sua parametrização e validação para diversos locais e culturas.

Katerji et al. (2013) analisaram o desempenho do modelo AquaCrop após uma série de testes realizados em 12 ciclos de cultivo, relativos ao milho e ao tomate, cultivados na região do Mediterrâneo, com três níveis de estresse hídrico na planta: ausência de estresse hídrico na planta (controle), estresse moderado e estresse severo. Um dos resultados mostrou que o AquaCrop simulou adequadamente a cobertura diária do dossel (CC) nos tratamentos de controle de tomate e milho como também no tratamento de estresse moderado do milho. No tratamento com estresse severo do milho, os valores simulados de CC foram próximos aos valores medidos até 60 dias após a semeadura. Depois deste período, os valores simulados não se encaixaram nas medidas.

Haileselassie et al. (2016) objetivaram coletar dados para calibrar e validar o modelo AquaCrop para simular o rendimento e avaliar a estratégia ideal de irrigação e semeadura para

Quncho-teff (cereal comum na Etiópia) em diferentes locais na Etiópia. Os resultados sugerem que o modelo AquaCrop pode ser usado para identificar estratégias de gerenciamento de recursos agrícolas otimizadas para a produção de teff.

Mirsafi et al. (2016) calibraram o modelo AquaCrop para o rendimento do açafrão e depois avaliaram seu desempenho na simulação do crescimento da cultura com base num conjunto de dados de um experimento de 6 anos na área semiárida do Irã. Esses dados consistiram em diferentes combinações de manejos de irrigação, incluindo irrigação total, diferentes níveis de irrigação deficitária e irrigação por chuva (sem irrigação). Os diversos resultados encontrados pelos autores possibilitaram concluir que o AquaCrop também pode ser utilizado para simular culturas perenes satisfatoriamente desde que o modelo seja cuidadosamente parametrizado e bem calibrado.

Montoya et al. (2016) descreveram os processos de calibração e validação do modelo AquaCrop para a simulação do crescimento e desenvolvimento de uma cultura de batata (cultivar Agria) irrigada com sistema de pivô central. Os experimentos de campo foram realizados durante 2011 (calibração) e 2012 (validação) em uma região semiárida no sudeste da Espanha. As batatas foram irrigadas com quatro tratamentos (120, 100, 80 e 60% da necessidade de água). O modelo AquaCrop foi ajustado para a simulação do crescimento e desenvolvimento da batata nas condições climáticas da área de estudo. A cobertura de dossel, a matéria seca total, a matéria seca dos tubérculos e a evapotranspiração foram as principais variáveis analisadas. Uma das conclusões foi que os indicadores estatísticos como o índice de concordância de Willmott (d) e o coeficiente de determinação (R^2) mostraram bons valores (d e $R^2 > 0,90$) para as variáveis primárias analisadas.

Akumaga et al. (2017) avaliaram a capacidade do AquaCrop de simular a produtividade cumulativa de grãos de milho de sequeiro para diferentes níveis de fertilidade do solo na região de Savana da Guiana, no norte da Nigéria. Foram utilizados sete anos (2007-2013) de dados experimentais de campo para o milho cultivado sob condições de sequeiro no Instituto de Pesquisa Agropecuária, para calibrar (conjunto de dados de 2007) e validar (conjunto de dados 2008-2013) o AquaCrop. Avaliou-se o desempenho do modelo através da comparação entre a produção de milho simulada e a real por meio do coeficiente de determinação (R^2), índice de concordância de Willmott (d), dentre outras medidas utilizadas para este fim. Alguns dos resultados mostraram que os valores de R^2 variaram de 0,82 a 0,99 enquanto que os valores de d variaram de 0,6 a 0,88.

Diversos autores também testaram a capacidade do AquaCrop na simulação de produtividades de diferentes culturas como por exemplo: algodão (BAUMHARDT et al.,

2009), milho (HSIAO et al., 2009), cevada (ARAYA et al., 2010) e óleo de canola (ZELEKE et al., 2011). Demais resultados ainda podem ser encontrados em Vanuytrecht et al. (2014), Paredes et al. (2015), Pereira et al. (2015), dentre outros.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

A área de estudo onde foi realizada esta pesquisa está localizada no município de Campina Grande-PB (Figura 2), inserida na Microrregião Campina Grande e na Mesorregião Agreste Paraibano do Estado da Paraíba (CPRM, 2005).

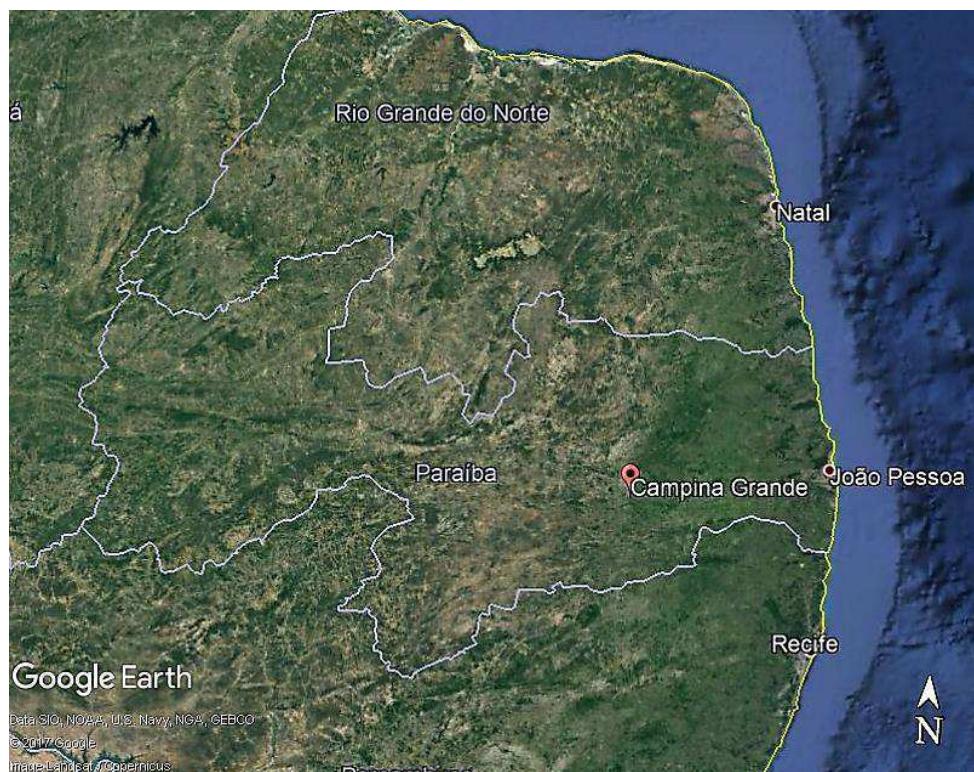


Figura 2. Localização do município de Campina Grande-PB
Fonte: Google Earth Pro, 2017

Campina Grande apresenta relevo variando de 337 m a 665 m acima do nível médio do mar. Devido à sua localização, a cidade é beneficiada por temperaturas menores e de uma ótima ventilação, que proporciona um clima ameno e agradável (MEDEIROS et al., 2011). Ainda de acordo com os autores, Campina Grande se situa na fronteira entre microrregiões de clima e vegetação bastante diversos. Ao nordeste, a paisagem é verde e arborizada, típica do brejo presente nas partes mais altas do planalto. Ao sudeste, encontra-se uma paisagem típica do Agreste, com árvores e pastagens. As regiões oeste e sul do município predominam clima e vegetação do Cariri, com vastas áreas de vegetação rasteira tipo caatinga e clima seco. A Tabela 2 exibe características climáticas do município de Campina Grande-PB.

Tabela 2. Dados meteorológicos climáticos médios de Campina Grande-PB no período de 1977 a 2015

Dados Meteorológicos	Média Anual
Pressão Atmosférica (mbar)	951,9
Temperatura média compensada do ar (°C)	23,3
Temperatura Máxima do ar (°C)	28,6
Temperatura Mínima do ar (°C)	20,1
Precipitação Total (mm)	808,7
Evaporação acumulada do ar (mm)	1523,0
Umidade Relativa do ar (%)	78,1
Isolação Total (h)	2563,1

Notas:

Este período não contém os anos de 1991 a 1994 além de 2001

Alguns valores no decorrer de toda a série foram estimados pela ausência de dados reais

Pela classificação climática de Köppen, o clima é considerado Tropical, com temperatura média do mês mais frio superior aos 18 °C e precipitação média anual superior a 700 mm (confirmado pela tabela acima) cuja fórmula climática é Asi (CABRAL JUNIOR et al., 2013).

4.1.1. Área experimental

Os experimentos foram desenvolvidos na Estação Agrometeorológica Experimental (EstAgro) (7°12'52,85" S e 35°54'26,78" O) do Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como mostra a Figura 3.



Figura 3. Estação Agrometeorológica Experimental (EstAgro-DCA) da Universidade Federal de Campina Grande-PB

O experimento foi realizado com 10 canteiros separados em torno de 0,38 m, com dimensões internas de 1 m de largura, 7,6 m de comprimento e altura de aproximadamente 0,15 m cada. Na área útil total do canteiro, que totaliza aproximadamente 7,6 m², foram transplantadas 12 plantas com espaçamento de 0,6 m entre cada planta.

4.2. Análise de solo e adubação

A análise das características químicas do solo na área de cultivo foi possível através da retirada de amostras do solo no interior dos canteiros com trado de anel (Uhland) em duas profundidades (0-20 cm) e (20-40 cm). A adubação (Quadro 1) foi realizada com base nos resultados da análise química do solo.

A determinação das características físicas do solo foi através dos resultados obtidos pela retirada de amostras de solo (em camadas de 10 cm) na área próxima à pesquisa com profundidades (0-70 cm), como também no interior dos canteiros (0-60 cm).

Quadro 1. Etapas de aplicação de produtos ao longo do experimento

Atividade	Nome comercial do produto	Quantidade e/ou dose
Adubação de fundação	SUPERSTART™ - YARA (N-P-K) 13-33-08	50 g/planta
Aplicação foliar	BOOSTER Mo - AGRICHEM	2 ml/litro
Aplicação foliar	PROSPER - OXIQUÍMICA AGROCIÊNCIA	0,5 ml/litro
1 ^a Adubação de cobertura	NKALCIO YARA LIVA (N-P-K) 12-05-11 com 13% de Ca e 0,2 de B	20 g/planta
2 ^a Adubação de cobertura	NKÁLCIO YARA LIVA (N-P-K) 09-00-24 com 11,4% de Ca e 0,18% de B	40 g/planta
Aplicação foliar	CÁLCIO F - QUIMIFOL	2 g/litro
3 ^a Adubação de cobertura	NKÁLCIO YARA LIVA (N-P-K) 09-00-24 com 11,4% de Ca e 0,18% de B	40 g/planta
Aplicação foliar	CAL SUPER - AGRICHEM	25 ml/litro
Aplicação foliar	FREXUS® CH FERT - ARCH QUÍMICA BRASIL LTDA.	1 g/ litro

4.3. Cultura utilizada

A cultivar estudada foi a variedade “Shanty”, da empresa HAZERA BRASIL, que é subsidiária da HAZERA. Esta variedade tem hábito de crescimento determinado, grupo salada, apresentando extraordinária produtividade e precocidade, inclusive em altas temperaturas, com

fruto vermelho intenso, muito firme e com excelente sabor. Ainda apresenta vida longa pós-colheita, produzido em campo aberto, rasteiro ou meia estaca, com plantio o ano todo. Os frutos oriundos desta variedade apresentam peso médio de 140 a 170 gramas, com período em média de colheita de 60 dias após transplante.

A variedade “Shanty” apresenta resistência a: *Verticillium dahliae* - Vd (murcha-de-verticílio), *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* - Fol 1 e 2 (murcha-de-fusário), *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* - Pst (mancha-bacteriana), *Tomato spotted wilt virus* - TSWV (vírus do vira-cabeça do tomateiro), *Stemphylium lycopersici* - Sl e *Tomato yellow leaf curl virus* - TYLCV.

4.4. Preparo da área e teste de vazão

Antes do transplantio, realizou-se capinas manuais para limpeza da área dentro dos canteiros, como também ao redor deles para eliminação de plantas espontâneas. Foi realizado a aração da terra com auxílio de enxada e pá, cerca de 15 cm de profundidade em todos os canteiros, acrescentando esterco de gado, cuja área preparada encontra-se na Figura 4a. O solo foi deixado próximo da capacidade de campo (FC) em poucos dias de antecedência ao processo de transplantio.

Foram realizados o ajuste e monitoramento com intuito da definição da vazão média dos gotejadores, conforme Figura 4b. A etapa se deu através de amostragem de pontos em todas as 10 linhas de gotejadores. Para tanto, utilizou-se de copos descartáveis, colocados em pequenas covas abertas, que contabilizaram as vazões (ml) nestes pontos em cada linha, pelo tempo definido de 1 minuto, realizando posteriormente a conversão para litros por hora (l/h). Na repetição do experimento, realizado no ano de 2017, foi estabelecido o mesmo padrão de preparo dos canteiros.



Figura 4. Preparo da área antes de ser efetuado o transplantio: a) preparação do solo para adubação; b) determinação da vazão média (l/h) por gotejador na área de estudo

4.5. Época do transplantio

As mudas foram adquiridas de uma empresa particular, localizada no Recife-PE, transportadas numa bandeja contendo aproximadamente 200 plantas (Figura 5a) com período médio de 25 dias, apresentando altura uniforme, com idade de aproximadamente 25 dias da semeadura. O processo de transplantio para o 1º experimento foi realizado no dia 09-09-2016, conforme exibido na Figura 5b. O segundo experimento foi realizado no dia 14-03-2017, seguindo a mesma metodologia do ano anterior.

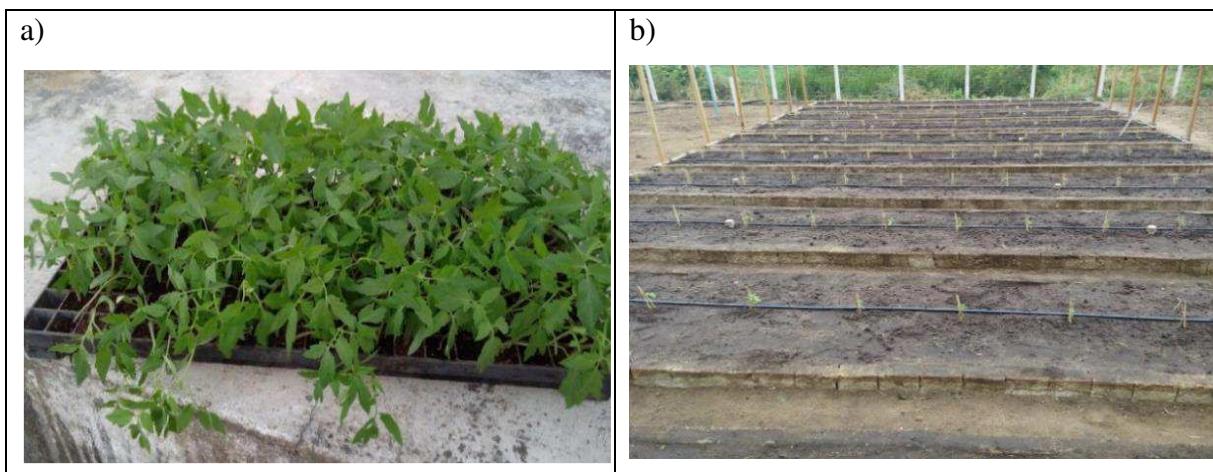


Figura 5. Etapas do transplantio: a) bandeja contendo aproximadamente 200 mudas do tomateiro variedade “Shanty”; b) mudas transplantadas no dia 09-09-2016

4.6. Tratos culturais

As plantas foram tutoradas com auxílio de palitos (Figura 6a) logo após o processo de transplantio. Após o período de adaptação das plantas, os tomateiros foram conduzidos com auxílio de fitilho mantendo-os eretos a partir do solo (Figura 6b), além de ter sido acrescentado, caso fosse necessário, um pequeno galho apoiado a cada planta com objetivo de se reduzir perdas de frutos por contato com o solo e melhorar a qualidade dos mesmos, além de otimizar a área interna de cultivo. No período final da cultura, as plantas permaneceram praticamente apoiadas ao solo para evitar possíveis quebras de galhos, perdas de frutos e demais prejuízos que poderiam reduzir a produtividade final (Figura 6c). No 2º experimento, o processo foi o mesmo para a fase de adaptação dos tomateiros, porém, o galho de suporte foi substituído pelo uso de fitilhos laterais colocados sob os tomateiros, conforme evidencia a Figura 6d.

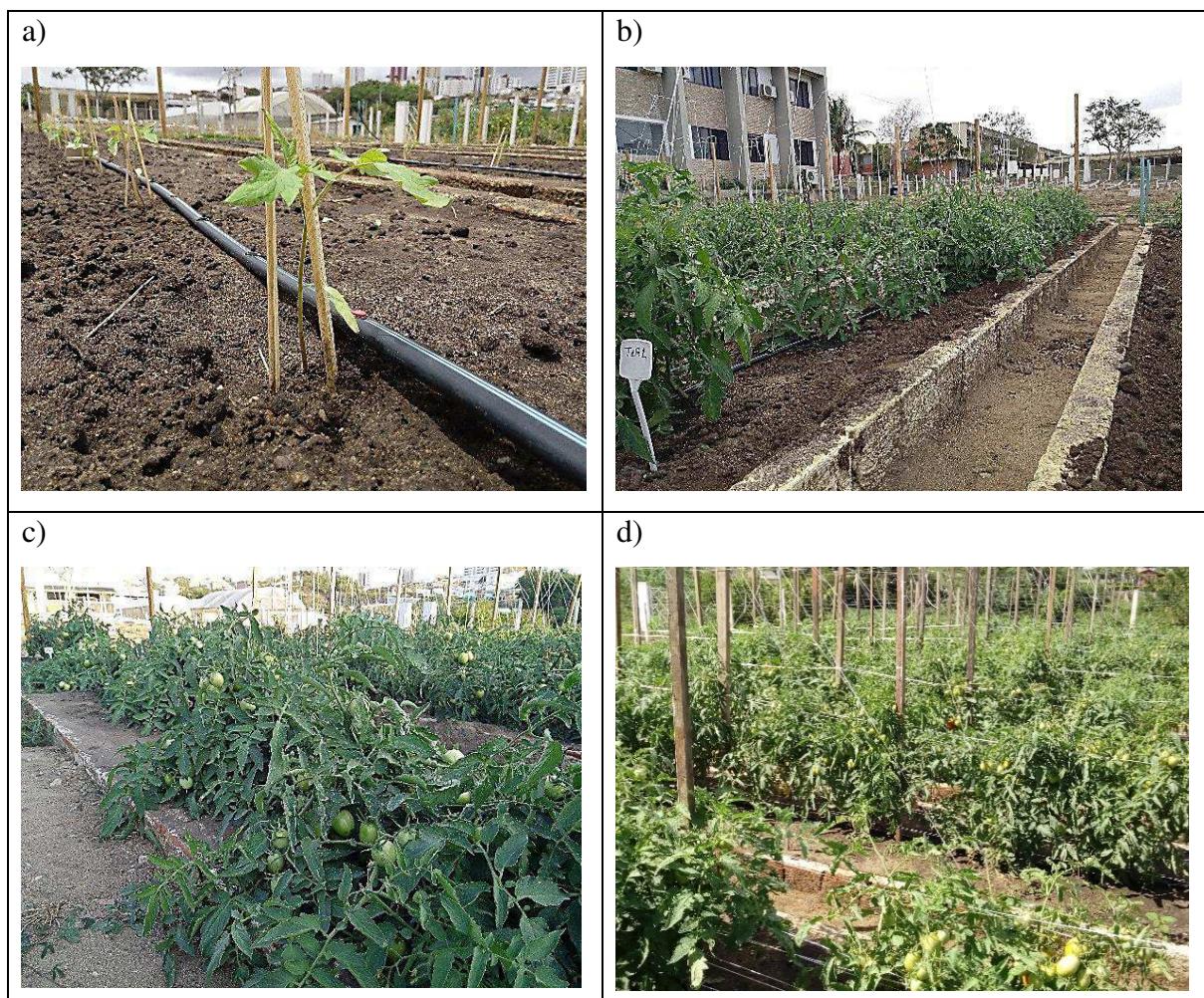


Figura 6. Sistema de condução dos tomateiros: a) logo após o transplantio (1º experimento); b) após a substituição das varetas pelo fitilho, utilizados como apoio até o final do experimento (1º experimento); c) conduzidos no final do 1º experimento; d) realizados com auxílio de vários fitilhos laterais e também verticais no 2º experimento

4.6.1. Controle de plantas invasoras, pragas, doenças etc.

As limpezas e condução foram realizadas semanalmente, propiciando assim, crescimento uniforme das plantas. O controle de plantas invasoras foi feito através de capinas manuais em toda área estudada, quando necessário. Já para o controle fitossanitário, foram utilizados produtos conforme exibidos a seguir (Quadro 2). As dosagens foram realizadas de acordo com recomendação fornecida pelos fabricantes dos produtos, além do uso do equipamento de proteção individual (EPI).

Quadro 2. Relação de produtos utilizados para o controle no experimento

Controle	Nome comercial do produto
Formigas	KELLMICIDA 200 PROPOXUR - KELLDRÍN
Formigas	MIREX-S MAX - ATTA-KILL
Mosca-minadora	ABAMEX - NUFARM
Broca-pequena-do-fruto e Broca grande do fruto.	KARATE ZEON 50 CS - SYNGENTA
Pinta-preta, Septoriose e Requeima	CABRIO TOP - BASF

4.7. Delineamento experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, onde foram testados 5 tratamentos de irrigação com 4 repetições, totalizando 20 parcelas experimentais. Os tratamentos são apresentados no Quadro 3. Cada parcela foi representada pela metade de um canteiro. O delineamento experimental é exibido na Figura 7.

Quadro 3. Significado dos tratamentos aplicados nos experimentos do tomateiro

Tratamentos	Significado
T1	Reposição de 100% da necessidade hídrica da cultura
T2	Reposição de 80% da necessidade hídrica da cultura
T3	Reposição de 60% da necessidade hídrica da cultura
T4	Reposição de 40% da necessidade hídrica da cultura
T5	Reposição de 20% da necessidade hídrica da cultura

R2	R3	R1	R3	R2	R3	R4	R2	R4	R1
R4	R1	R3	R2	R4	R4	R2	R1	R1	R3
T3C01	T4C02	T5C03	T2C04	T4C05	T1C06	T5C07	T1C08	T2C09	T3C10

Figura 7. Espacialização aleatória dos tratamentos na área experimental. T: representa os tratamentos, 1, 2, 3, 4 e 5; R: representa as repetições 1, 2, 3 e 4 e C: numeração dos dez canteiros utilizados nos experimentos.

Como os canteiros foram compostos por 2 repetições, sendo cada uma delas constituída de 6 plantas, para evitar problemas do efeito de bordadura nos tomateiros, foi desprezada a planta da extremidade de cada repetição. Isso resultou em 4 plantas para cada repetição utilizadas nas análises, totalizando 8 plantas em todo o canteiro, conforme esquematizado na Figura 8.

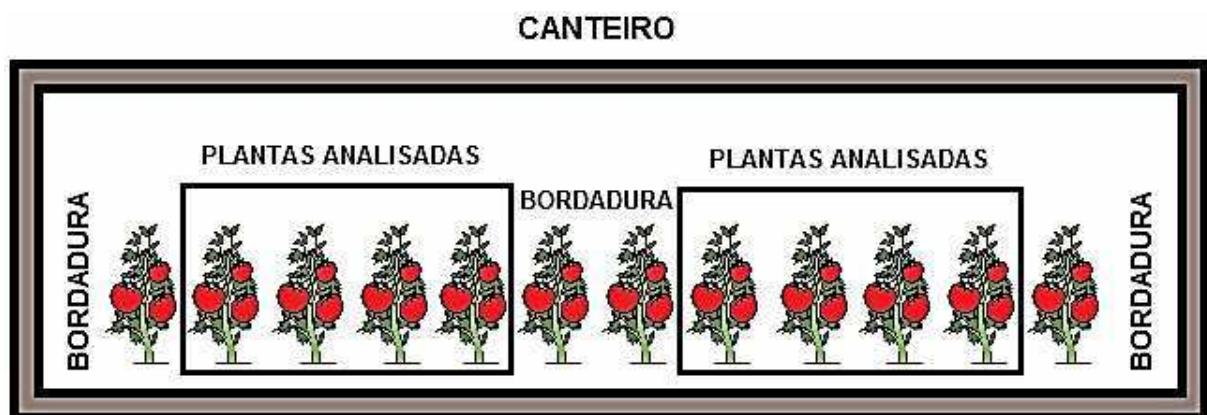


Figura 8. Parcela de plantas disponíveis para análises desprezando aquelas que poderiam sofrer o efeito de bordadura

Em cada parcela foram realizadas coletas de apenas duas plantas para todos os dados analisados nesta pesquisa.

4.8. Cálculo da evapotranspiração de referência (ET₀)

A evapotranspiração de referência foi determinada com auxílio do programa desenvolvido pela FAO, Land and Water Division, denominado *ET₀ Calculator*, seguindo o procedimento de Penman-Monteith da FAO (ALLEN et al., 1998) dada pela equação (2):

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_m + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (2)$$

em que:

ET₀: Evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹);

R_n: Saldo de radiação na superfície da cultura (MJ m⁻² dia⁻¹);

G: Densidade de fluxo de calor do solo (MJ m⁻² dia⁻¹);

T_m: Temperatura média diária do ar a 2 m de altura (°C);

u₂: Velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹);

e_s: Pressão de saturação do vapor d'água atmosférica (KPa);

e_a: Pressão de vapor real (KPa);

e_s - e_a: Déficit de pressão de vapor de saturação (KPa);

Δ: Inclinação da curva de pressão de vapor saturado (KPa °C⁻¹);

γ: Constante psicrométrica (KPa °C⁻¹).

Vale destacar na equação (2) que o valor 0,408 converte o saldo de radiação R_n expressa em MJ mm⁻² dia⁻¹ para a evaporação equivalente expressa em mm dia⁻¹. Como o fluxo de calor do solo é pequeno em comparação com R_n, particularmente quando a superfície é coberta por vegetação e os intervalos de tempo para o cálculo são 24 horas ou mais, a estimativa de G é ignorada no programa, assumindo-se valor zero. Isso corresponde aos pressupostos relatados no Documento de Irrigação e Drenagem da FAO n° 56 para períodos diários e de 10 dias.

Os dados utilizados na entrada do programa para estimativa da ET₀ (mm dia⁻¹) foram: temperatura máxima do ar (T_{max} - °C), temperatura mínima do ar (T_{min} - °C), umidade relativa máxima do ar (UR_{max} - %), umidade relativa mínima do ar (UR_{min} - %), velocidade do vento (m s⁻¹) e Radiação solar (Rs), expressa em W m⁻². Estes dados foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e, na ausência destes dados diários, foi complementado com informações obtidas de alguns sensores instalados dentro da área de estudo.

4.9. Irrigação

As irrigações foram realizadas através do sistema por gotejamento, sendo um gotejador por planta na linha lateral por fileira de planta. Em cada canteiro estudado, a tubulação desse sistema de irrigação por gotejamento ficou centralizada, contendo ao todo, exatamente 12 gotejadores, ou seja, um gotejador para cada planta. A irrigação foi diária com base na necessidade hídrica da cultura em função de cada tratamento abordado na pesquisa.

O cálculo da necessidade hídrica da cultura (NHC) foi obtido através da multiplicação entre a evapotranspiração de referência (ET_o) e o coeficiente de cultura (Kc_{FAO}) de referência obtido da FAO, conforme equação 3 abaixo:

$$NHC = ET_o \cdot Kc_{FAO} \quad (3)$$

em que:

NHC : Necessidade hídrica da cultura ($mm\ dia^{-1}$);

ET_o : Evapotranspiração de referência ($mm\ dia^{-1}$);

Kc_{FAO} : Coeficiente de cultura obtido da FAO (adimensional).

Os valores do Kc do tomateiro utilizados para irrigação foram os propostos pela FAO, conforme Tabela 3, em função da duração de dias de cada estágio da cultura. A utilização destes coeficientes, em cada estágio, se deu também através da observação visual das características do tomateiro ao longo do experimento.

Os valores do Kc foram ajustados tendo como limite o início de colheita (por volta 60 dias nesta região) por meio da informação fornecida pela empresa responsável pela fabricação das sementes variedade “Shanty”.

Tabela 3. Valores do coeficiente de cultivo do tomateiro utilizados como base para a determinação da lâmina bruta aplicada aos tomateiros

Estágios da cultura	Duração (dias)	Faixa do Kc
Inicial	10 a 15	0,4 - 0,5
Desenvolvimento	20 a 30	0,7 - 0,8
Intermediário	30 a 40	1,05 - 1,25
Final	30 a 40	0,8 - 0,9
Colheita	---	0,6 - ,065

Fonte: FAO (2018)

Nota: As informações desta tabela são semelhantes às utilizadas nos experimentos de 2016 e 2017.

De posse destas informações, a lâmina bruta (LB) de irrigação diária (mm/dia) aplicada nos canteiros foi obtida através da seguinte equação:

$$LB = \frac{NHC}{E_{AP}} \quad (4)$$

em que:

LB: Lâmina bruta de irrigação diária (mm);

E_{AP} : Eficiência de aplicação do sistema de irrigação (0,9).

O termo E_{AP} refere-se a eficiência do sistema de irrigação empregado. Em geral, os valores variam de 0,80 a 0,90 para sistemas por aspersão e de 0,90 a 0,98 para sistemas de irrigação por gotejamento (ALVARENGA, 2013).

4.10. Monitoramento da umidade do solo

Foram instalados 2 tubos de acesso de cano em PVC (devidamente enumerados) em cada canteiro, com 1 m de comprimento cada, diâmetro externo de 56,5 mm e interno de 51 mm, vedados embaixo e apropriados para utilização do equipamento dentro dos canteiros localizados na estação (Figura 9a). Esses canos ficaram apenas 0,05 m acima do nível da superfície, praticamente para uso de uma tampa para evitar inundação em seu interior (Figura 9b).

O monitoramento da umidade do solo para utilização no balanço hídrico foi realizado por meio da sonda de capacitância modelo Diviner 2000, Sentek Pty Ltd., Austrália (Figura 9c). As leituras foram realizadas semanalmente (em dias da semana), no período da tarde, de forma que, assim que se insere a sonda dentro do tubo, a mesma começa a fazer uma varredura a cada 10 cm de profundidade indo até a camada de 80 cm. Os dados ficam armazenados no Datalogger do equipamento, constando dentre algumas informações, a umidade do solo com calibração do fabricante.



Figura 9. Monitoramento de água no solo. a) posicionamento dos tubos em PVC instalados nos canteiros; b) processo de coleta da umidade do solo realizados em dias de cada semana de estudo; c) equipamento (Diviner 2000)

4.11. Balanço hídrico e evapotranspiração da cultura (ETc)

O balanço de água no solo foi realizado para o tratamento de 100% por meio de dados meteorológicos do experimento de campo e do monitoramento da umidade do solo feita pela sonda capacitiva Diviner 2000. Através deste balanço hídrico foi possível determinar a evapotranspiração da cultura (ETc) através da seguinte equação:

$$ET_c = Pr + I \pm R + A - Dp \pm \Delta S \quad (5)$$

em que:

ET_c: Evapotranspiração da cultura (mm);

Pr: Precipitação pluviométrica (mm);

I: Lâmina de irrigação (mm);

R: Escoamento superficial (mm);

A: Ascensão capilar (mm);

Dp: Drenagem profunda (mm);

ΔS : Variação do armazenamento de água do solo (mm) no intervalo de tempo considerado.

O escoamento superficial (R) foi desprezado face a topografia dos canteiros ser plana. Como o lençol freático da região é superior a 1 m e o volume de controle do tomateiro foi até 0,8 m, a ascensão capilar (A) foi também desconsiderada. A drenagem profunda (Dp) foi desconsiderada pela não ocorrência de chuvas extremas no período de estudo e uso da irrigação controlada.

A variação do armazenamento de água no perfil do solo (ΔS), considerando a profundidade de 80 cm neste estudo, foi determinada pela diferença dos valores do conteúdo de água do solo obtidos do perfil final e inicial para cada período considerado (dia), através da equação:

$$\Delta S = (\theta_2 - \theta_1) \cdot Z_{BH} \quad (6)$$

em que:

ΔS : Variação do armazenamento de água nos dias considerados (mm);

θ_2 : Umidade do solo encontrada no tempo 2 (final), $m^3 m^{-3}$;

θ_1 : Umidade do solo encontrada no tempo 1 (inicial), $m^3 m^{-3}$;

Z_{BH} : Profundidade considerada para o balanço hídrico (0,8 m).

4.12. Coeficiente de cultura (K_c)

O coeficiente do tomateiro foi obtido através da divisão da evapotranspiração da cultura (ET_c) pela evapotranspiração de referência (ET_o) através da seguinte forma (ALLEN et al., 1998):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (7)$$

em que:

K_c: Coeficiente de cultura (adimensional);

ET_c: Evapotranspiração da cultura (mm/dia);

ET_o: Evapotranspiração de referência (mm/dia).

4.13. Modelo de simulação de cultura: FAO 33

Esforços na modelagem de simulação de culturas, destinados principalmente para a integração de conhecimentos fisiológicos, foram iniciados na década de 1960 por diversos grupos de pesquisa, cientistas, estudantes e usuários avançados em agricultura altamente comercial, representando os usuários típicos destes modelos.

A complexidade das respostas da cultura a déficits de água levou desde cedo ao uso de funções de produção empírica como a opção mais prática de avaliar o rendimento da cultura em relação à disponibilidade hídrica. Entre os métodos baseados nesta abordagem, destaca-se a FAO Irrigação & Drenagem nº 33 (DOORENBOS E KASSAM, 1979). Por décadas, esse relatório foi amplamente adotado e usado para estimar o rendimento de diversas culturas em resposta a água, particularmente pelos planejadores, economistas e engenheiros.

A equação proposta por Doorenbos e Kassam (1979) mostrando a relação entre o rendimento da cultura e sua evapotranspiração, onde a redução relativa do rendimento está relacionada com a redução relativa da evapotranspiração, é abordada através da seguinte forma (STEDUTO et al., 2009; SMITH e STEDUTO et al., 2012):

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_{max}}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_{max}}\right) \quad (8)$$

em que:

Y_a : Rendimento real (ton/ha);

Y_{max} : Rendimento máximo na ausência de estresse hídrico (ton/ha);

ET_a : Evapotranspiração real (mm/unidade de tempo);

ET_{max} : Evapotranspiração máxima (mm/unidade de tempo);

K_y : Coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (adimensional).

O coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (K_y) captura a essência das ligações complexas entre a produção e o uso da água por certa cultura. A relação tem mostrado notável validade e permitiu um procedimento viável para quantificar os efeitos do déficit hídrico sobre o rendimento das culturas (SMITH e STEDUTO et al., 2012).

4.13.1. Descrição do AquaCrop

Mantendo o conceito original de uma relação direta entre o consumo de água pela planta e a produtividade da cultura, o modelo AquaCrop evoluiu a partir da abordagem de Doorenbos e Kassam (1979), separando a evaporação não-produtiva do solo (E) da transpiração produtiva da cultura (T_r) e estimando a produção de biomassa diretamente da transpiração real da cultura através de um parâmetro de produtividade da água. As mudanças levaram às seguintes equações (STEDUTO et al., 2009):

$$B = WP \cdot \sum T_r \quad (9)$$

e

$$Y = B \cdot HI \quad (10)$$

em que:

B: Biomassa seca (ton/ha);

WP: Produtividade da água (ton/ha mm);

Tr: Transpiração da cultura (mm/unidade de tempo);

Y: Produtividade final (ton/ha);

HI: Índice de colheita (%).

Os processos subjacentes que culminaram em B e em HI são bastante diferentes de um para o outro. Logo, a separação de Y em B e HI torna possível por considerar os efeitos das condições ambientais e as tensões em B e HI separadamente (STEDUTO et al., 2012).

A compreensão das relações cultura-água-rendimento teve melhorias de forma acentuada desde 1979 e tornou possível o progresso da equação (8) para as equações (9) e (10). O WP, quando normalizado para a demanda por evaporação, se comporta de forma conservadora (STEDUTO et al., 2007), ou seja, o WP normalizado (WP*) permanece praticamente constante numa gama de ambientes. Isso tem implicações fundamentais para a robustez do modelo que é ainda reforçada pela quantificação do índice de colheita diário durante o período de formação do rendimento.

O conhecimento melhorado das respostas das plantas ao estresse hídrico em escalas curtas de tempo (de segundo a horas), capacidade de computação aprimorada e procedimentos mais precisos para determinação diária do estado de água do solo tornou possível a simulação em etapas diárias de tempo. Isso permitiu a mudança importante de uma abordagem estática para um modelo de crescimento dinâmico. A Figura 10 exibe a representação esquemática da evolução de AquaCrop da equação (8) para as equações (9) e (10), conforme (STEDUTO et al., 2012).

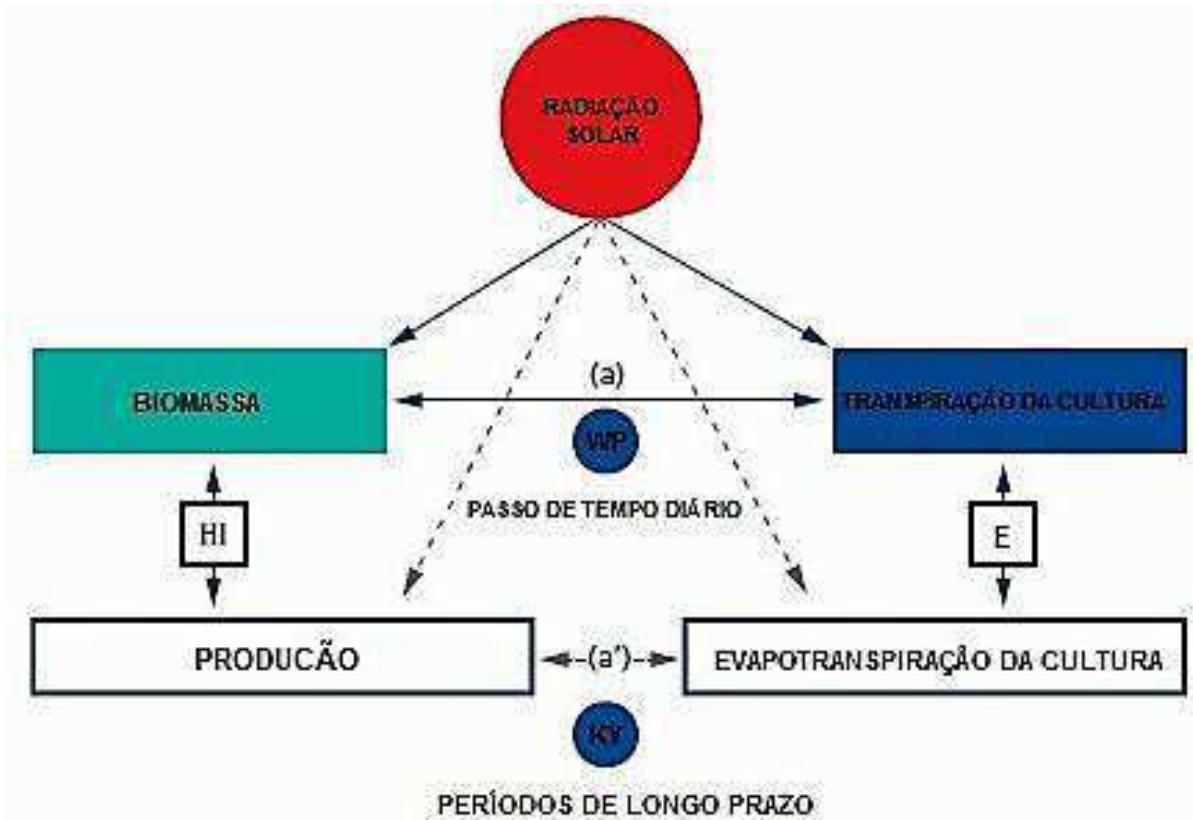


Figura 10. Evolução do AquaCrop a partir da equação (8), com base na introdução de duas etapas intermediárias: a separação da evaporação do solo (E) da transpiração da cultura (Tr) e a obtenção do rendimento (Y) da biomassa (B) e do índice de colheita (HI). A relação (a''), que liga o rendimento à evapotranspiração da cultura, é expressa através da equação (8) através do parâmetro Ky e normalmente se aplica a períodos de longo prazo. A relação (a), ligando a biomassa à transpiração da cultura, é expressa através da equação (9) através do parâmetro WP e tem um passo de tempo diário

Fonte: Steduto et al. (2012)

Um destaque importante é que o AquaCrop não considera as pragas e doenças. Assim, como em outros modelos, o AquaCrop é estruturado em cima do contínuo solo-cultura-atmosfera, consistindo em quatro componentes: atmosfera, cultura, solo e manejo. Na atmosfera, o modelo inclui o seu regime térmico, precipitação, demanda por evaporação e concentração de dióxido de carbono. No item solo, são inseridos dados do balanço hídrico neste solo. Na cultura, é adicionado o seu crescimento, desenvolvimento e processos de produção e, por fim, o manejo onde são inseridos dados da irrigação, mas também os níveis de fertilidade do solo.

4.13.1.1. Clima

No AquaCrop, o componente atmosférico que tem interferência na cultura é o clima. Nele são inseridas as variáveis meteorológicas: temperaturas máxima e mínima do ar,

precipitação, demanda de evaporação da atmosfera expressa como a evapotranspiração de referência (ETo) e a concentração de dióxido de carbono (CO₂) anual média da atmosfera (ppm).

As primeiras quatro variáveis meteorológicas são obtidas através de registros típicos das estações agrometeorológicas e a concentração de CO₂ é a média anual, medida pelo Observatório Mauna Loa, no Havaí. O AquaCrop armazena os registros histórico e atual dos valores da concentração de CO₂, enquanto que para os demais anos à frente o usuário precisará fornecê-los. O cálculo da ETo é realizada pela equação de Penman-Monteith seguindo os procedimentos descritos no Boletim nº 56 da FAO (ALLEN et al., 1998).

Na ausência de dados meteorológicos diários, o próprio AquaCrop transforma registros médios de décadas ou mensais em valores diários através de procedimentos embutidos no modelo (RAES et al., 2009).

A temperatura do ar influencia no desenvolvimento das culturas (fenologia, produção de biomassa e polinização); a precipitação e a ETo são determinantes no balanço hídrico do solo na zona radicular e a concentração de CO₂ da atmosfera influencia tanto na WP como no crescimento das folhas (STEDUTO et al., 2009).

4.13.1.2. Cultura

O componente da cultura no modelo inclui os seguintes subcomponentes: fenologia, cobertura do dossel, profundidade de enraizamento, transpiração da cultura, evaporação do solo, produção de biomassa e rendimento alcançável.

Após a emergência, a cultura cresce e se desenvolve ao longo de seu ciclo de crescimento, expandindo sua cobertura e aprofundando seu sistema radicular, transpirando água e acumulando biomassa, enquanto progride através dos seus estádios fenológicos. O índice de colheita (HI) altera a porção de biomassa que será colhida. É importante notar que no AquaCrop, além da partição de biomassa em rendimento, não há outra divisão entre os vários órgãos de plantas, que evita lidar com a complexidade e incertezas associadas aos processos deste particionamento.

4.13.1.3. Estresse hídrico

O estresse hídrico pode ter grande impacto na produtividade e rendimento da cultura dependendo do tempo, gravidade e duração. O modelo diferencia quatro efeitos de estresse: no

crescimento do dossel, na condutância estomática, na senescência do dossel e no índice de colheita (HI). Com exceção do HI, esses efeitos se manifestam por meio de seus coeficientes individuais de estresse (K_s), sendo o indicador da intensidade relativa desse efeito (STEDUTO et al., 2009).

O K_s é o parâmetro modificador do alvo do modelo. Acima do limite superior do conteúdo de água no solo, não considera-se o estresse ($K_s = 1$); já abaixo do limite inferior, o efeito do estresse é absoluto ($K_s = 0$). Para o estresse hídrico, K_s é uma função do conteúdo de água na zona da raiz, expressa como a redução fracionária (p) da quantidade total de água disponível (TAD, definida como o volume de água entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente) no solo (STEDUTO et al., 2009).

A relação de K_s vs. p geralmente não é linear devido a aclimatação da planta e sua adaptação ao estresse, e não-linear entre o potencial matricial vs. relações volumétricas de conteúdo de água no solo (STEDUTO et al., 2009). Como descrito em Raes et al. (2009), uma gama de formas de curvas para K_s vs. p é fornecida para se selecionar no AquaCrop.

4.13.1.4. Fenologia

De acordo com Steduto et al. (2009) sendo a fenologia determinada em grande parte pelas características da cultivar e regimes de temperatura, no modelo AquaCrop, semelhante a muitos outros, o tempo utilizado é o tempo térmico, ou seja, graus dia de crescimento (GDD) como o relógio padrão, porém só executado apenas no tempo diário (calendário). GDD é calculado conforme descrito por McMaster e Wilhelm (1997), com uma modificação importante, que não é feito qualquer ajuste da temperatura mínima quando é menor que a temperatura de base. Isso permite a consideração mais realista dos danos causados pela temperatura do ar abaixo da temperatura de base e deve tornar as simulações de culturas de inverno mais realistas. Detalhes dos cálculos de GDD são dados por Raes et al. (2009).

4.13.1.5. Desenvolvimento do dossel

A cobertura do dossel verde (CC) é uma das características cruciais apresentadas no AquaCrop (Figura 11). Sua expansão, envelhecimento e senescência, juntamente com sua condutância controlada pelos estômatos, determinam a quantidade de água transpirada, o que por sua vez determina a quantidade de biomassa produzida. O AquaCrop se diferencia de outros modelos, pois expressa a quantidade de folhagem em termos de cobertura do dossel (em fração

ou percentagem) e não o índice de área foliar (IAF), resultando em uma simplificação significativa da simulação, o que permite ao usuário introduzir valores reais de CC, mesmo que sejam estimados visualmente (STEDUTO et al., 2012).

De acordo com Hsiao (1982), quando a cobertura do dossel é escassa, o crescimento do dossel é dependente do tamanho do dossel existente para a fotossíntese, e segue uma curva cinética de primeira ordem. A cobertura inicial do dossel (CC₀) é importante na simulação porque este valor é necessário para o início do processo de crescimento do dossel. Este parâmetro é obtido pela densidade de plantas multiplicada pela área foliar de uma plântula, quando ocorre a emergência de 90% das plântulas. Isso leva ao uso de uma equação de crescimento exponencial para simular o desenvolvimento do dossel para a primeira metade sob condições de não-estresse:

$$CC = CC_0 \cdot e^{CGC \cdot t} \quad (11)$$

em que:

CC: cobertura do solo pelo dossel no instante t (percentagem ou fração da cobertura do solo);
 CC₀: cobertura inicial do solo pelo dossel no instante t = 0 (percentagem ou fração da cobertura do solo);

CGC: coeficiente de crescimento do dossel (percentagem ou fração de aumento da cobertura do solo por dia ou graus-dia);

t: tempo (dia ou graus-dia).

No início, é esperado o crescimento exponencial do dossel após as plântulas da cultura se tornarem autotróficas, sendo que a taxa de crescimento do dossel é proporcional ao tamanho do dossel existente. Para a segunda metade da curva de crescimento, as plantas começam a sombrear mais o solo e assim o crescimento do dossel já não é proporcional ao tamanho do dossel existente. A segunda metade da curva segue um decaimento exponencial dado pela equação abaixo:

$$CC = CC_x - (CC_x - CC_0) \cdot e^{-CGC \cdot t} \quad (12)$$

em que:

CC_X: cobertura máxima do solo pelo dossel para condições ideais (percentagem ou fração da cobertura do solo).

Matematicamente, a cobertura máxima do dossel ocorre em $t = \infty$. Durante sua fase de desenvolvimento, o tamanho do dossel pode ser facilmente modulado pelo estresse hídrico, uma vez que o crescimento foliar é muito sensível ao estresse hídrico e pode ser retardado quando apenas uma pequena fração de água disponível no solo estiver esgotada, ou seja, o limite superior para o coeficiente de estresse hídrico do crescimento expansivo ($k_{s_{exp}}$) está abaixo de um valor da redução fracionária do total de água disponível (p). A equação para o cálculo deste efeito é a seguir:

$$CGC_{aj} = K_{s_{exp}} \cdot CGC \quad (13)$$

em que:

CGC_{aj}: Coeficiente de crescimento do dossel ajustado.

Como $k_{s_{exp}}$ está na faixa de 0 a 1, o crescimento do dossel começa a desacelerar abaixo da taxa máxima quando a depleção da água no solo atinge o limite superior e para completamente quando o esgotamento atinge o limite inferior. Vale lembrar que além de sua taxa de crescimento, o dossel pode começar a senescênciia mesmo durante sua fase de desenvolvimento se o estresse hídrico se tornar suficientemente grave. Como a cultura se aproxima da maturidade, CC entra numa fase de declínio devido a senescênciia de folhas. O declínio da cobertura do dossel verde no AquaCrop é descrito pela equação:

$$CC = CC_X \left[1 - 0,05 \left(e^{\frac{CDC}{CC_X} t} - 1 \right) \right] \quad (14)$$

em que:

CDC: coeficiente de declínio do dossel (percentagem ou fração de redução da cobertura do solo por dia ou graus-dia);

t: tempo desde o início da senescênciia do dossel (dia ou graus-dia).

A senescência do dossel pode ser acelerada pelo estresse hídrico em qualquer momento durante o ciclo de vida da cultura, desde que o estresse seja suficientemente grave. Este processo é simulado através do ajuste do coeficiente de declínio do dossel (CDC) por meio do coeficiente de estresse hídrico para senescência (K_{sen}), como mostra a equação 15 (STEDUTO et al., 2009):

$$CDC_{aj} = (1 - K_{sen}^8) \cdot CDC \quad (15)$$

em que:

CDC_{aj} : coeficiente de declínio do dossel ajustado em decorrência do estresse hídrico (percentagem ou fração de redução da cobertura do solo por dia ou graus-dia);

K_{sen} : coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel.

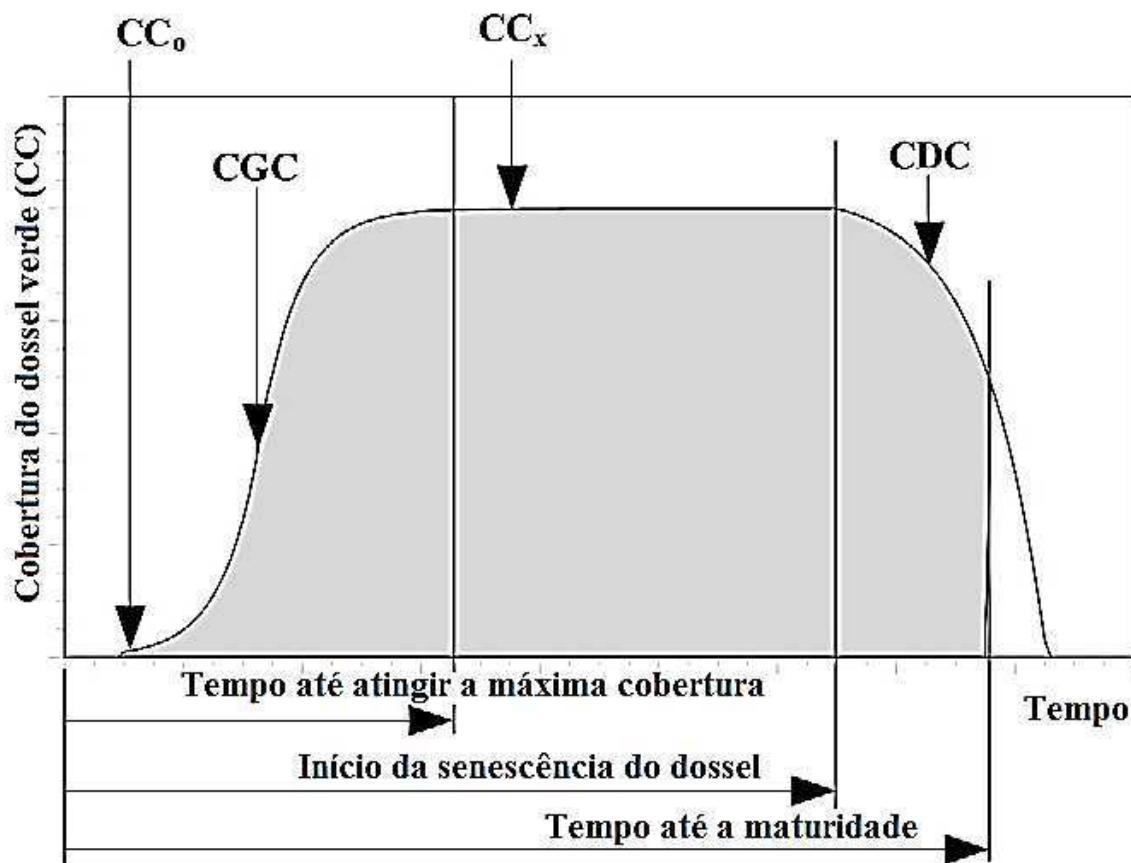


Figura 11. Exemplo da variação da cobertura do dossel verde ao longo de um ciclo de cultura sob condições de não-estresse. CC₀ e CC_x são cobertura inicial e máxima do dossel, respectivamente; o CGC é o coeficiente de crescimento do dossel; CDC é o coeficiente de declínio do dossel verde
Fonte: Steduto et al. (2009)

4.13.1.6. Sistema radicular e extração de água

A absorção de água pelo sistema radicular no AquaCrop é simulada através da Profundidade Efetiva de Enraizamento (ERD) e o padrão de extração de água. A ERD é definida como a profundidade do solo onde ocorre a proliferação das raízes suficiente para permitir uma absorção significativa da água pela cultura. A extração de água pelas raízes segue o padrão de 40, 30, 20 e 10% da água necessária retirados de cada $\frac{1}{4}$ de profundidade, iniciando do quarto superior até o inferior da ERD, quando o teor de água for adequado (STEDUTO et al., 2009). O padrão pode ser alterado pelo usuário, nos casos justificados por características físicas ou químicas específicas do solo (STEDUTO et al., 2012).

A equação (16) descreve a Profundidade Efetiva de Enraizamento desde o plantio até atingir a profundidade máxima.

$$Z = Z_{ini} + (Z_x - Z_{ini}) \sqrt[n]{\frac{(t - \frac{t_0}{2})}{(t_x - \frac{t_0}{2})}} \quad (16)$$

em que:

Z: Profundidade efetiva de enraizamento (m) no tempo t (em dias) após o plantio;

Z_{ini} : Profundidade de plantio (m) na semeadura;

Z_x : Profundidade máxima efetiva de enraizamento (m);

t_0 : É o tempo desde o plantio até a emergência efetiva (85-90%) da cultura;

t_x : É o tempo após o plantio quando Z_x for atingido;

n: Fator de forma da função.

Usualmente, o tempo utilizado é em graus dia de crescimento (ou dia). Embora o desenvolvimento radicular comece quando metade do tempo necessário para o surgimento das culturas ($t_0/2$) tenha ocorrido, sua eficiência nos cálculos do balanço hídrico no solo ocorre somente quando a profundidade mínima efetiva de enraizamento (Z_n) for excedida (Figura 12).

Sob condições ideais sem restrições de solo, é esperado que a profundidade máxima efetiva de enraizamento Z_x aconteça perto do final do ciclo de vida da cultura. Se houver em uma determinada profundidade uma camada de solo restritiva ao crescimento das raízes, elas

devem aprofundar normalmente até atingir essa camada restritiva e então diminui ou para completamente o processo de aprofundamento (STEDUTO et al., 2009).

A expansão da profundidade efetiva de enraizamento é simulada considerando-se a raiz n -ésima do tempo até atingir a profundidade máxima de enraizamento (STEDUTO et al., 2009). A taxa de expansão das raízes (dZ/dt) começa a ser reduzida pelo estresse hídrico quando a depleção na zona radicular excede o limite superior para o fechamento dos estômatos. A redução é determinada pela magnitude do coeficiente de estresse hídrico para o fechamento dos estômatos (K_{ssto}) e um fator de forma ($f_{shape} < 0$), conforme a equação:

$$dZ_{aj} = dZ \frac{e^{K_{ssto} - f_{shape} - 1}}{e^{f_{shape} - 1}} \quad (17)$$

em que:

dZ/dt : taxa de expansão das raízes;

f_{shape} : fator de forma da curva;

K_{ssto} : coeficiente de estresse hídrico para o fechamento dos estômatos.

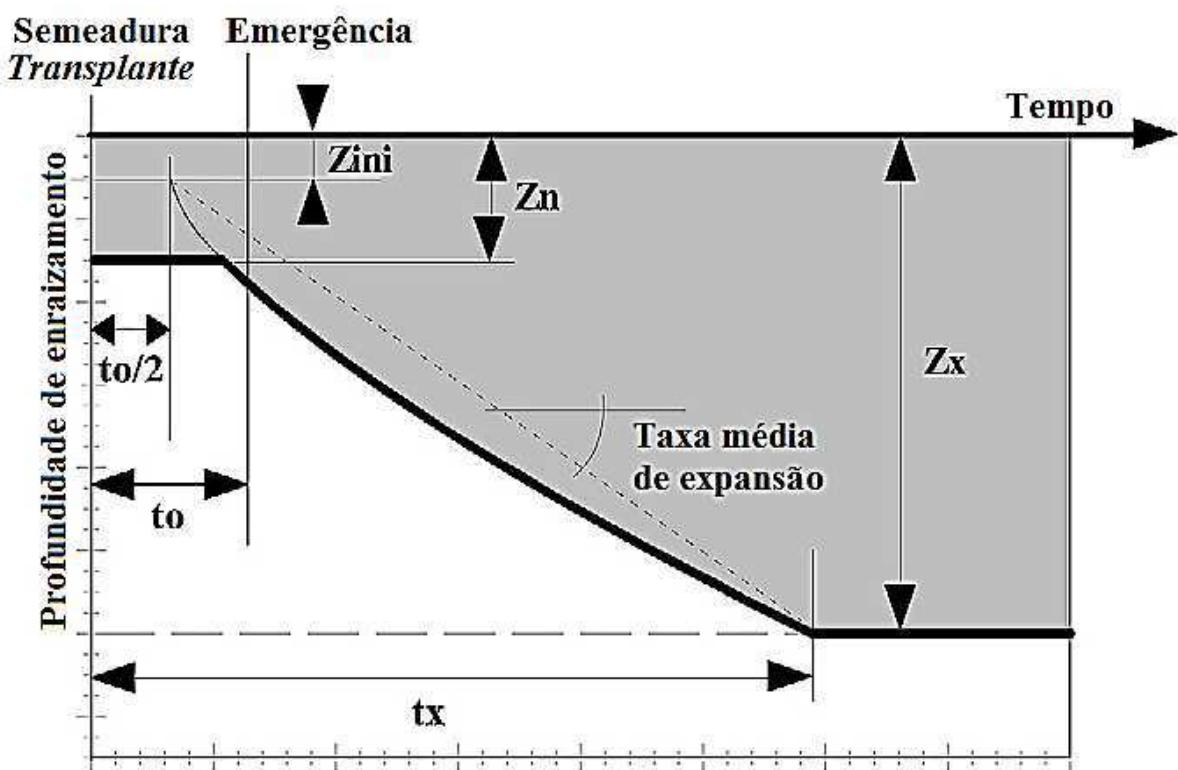


Figura 12. Representação esquemática generalizada do processo de desenvolvimento da profundidade de enraizamento ao longo do tempo
Fonte: Steduto et al. (2009)

4.13.1.7. Transpiração

No modelo AquaCrop, a transpiração (Tr) é basicamente proporcional a cobertura do solo pelo dossel (CC) quando não há o fechamento dos estômatos provocado por algum estresse hídrico, mas com um ajuste para a microadvecção nas entrelinhas e o efeito da cobertura parcial do solo pela planta (STEDUTO et al., 2009).

Segundo Raes et al. (2009) a equação de ajuste para os efeitos microadvectivos na CC (denominada CC*) foi baseada em dados experimentais de Adams et al. (1976) e Villalobos e Fereres (1990), cuja definição é:

$$CC^* = 1,72 \cdot CC - CC^2 + 0,30 \cdot CC^3 \quad (18)$$

Na ausência de estresse hídrico, Tr no AquaCrop é proporcional a CC*, calculada através da equação abaixo (RAES et al., 2009):

$$Tr = CC^* \cdot Kc_{Tr,x} \cdot ET_0 \quad (19)$$

em que:

$Kc_{Tr,x}$: coeficiente para a máxima transpiração da cultura.

Após a cobertura máxima do dossel (CCx) ser atingida e antes do início da senescência, o dossel tem um envelhecimento lento e sofre uma pequena redução progressiva na transpiração e capacidade fotossintética. Isto é simulado pela aplicação de um coeficiente de envelhecimento (f_{age}) que diminui o $Kc_{Tr,x}$ por uma fração constante e ligeira (por exemplo, 0,3%) por dia. Após a senescência ser desencadeada, a transpiração e capacidade fotossintética do dossel caem mais acentuadamente com o tempo.

4.13.1.8. Produção de biomassa

O parâmetro WP introduzido no AquaCrop é normalizado para a demanda por evaporação atmosférica definida pela ET_0 e pela concentração de CO_2 da atmosfera. A produtividade normalizada da água (WP*) mostrou-se praticamente constante para uma determinada cultura quando os nutrientes minerais não são limitantes, independentemente do

estresse hídrico, exceto nos casos extremamente severos. A calibração do WP e a normalização para as demandas por evaporação têm sido baseadas na equação:

$$WP^* = \left[\frac{B}{\sum \left(\frac{Tr}{ET_0} \right)} \right]_{[CO_2]} \quad (20)$$

O somatório se dá nos intervalos de tempo sequenciais que envolvem o período em que B é produzido. $[CO_2]$ fora do colchete indica que o valor normalizado é para uma determinada concentração de CO_2 no ar. Para a maioria das espécies de culturas, o WP^* aumenta à medida que a concentração de CO_2 no ar aumenta, permitindo a simulação do impacto sobre o rendimento em vários cenários de CO_2 e mudança climática. A equação é diretamente aplicável quando os dados de Tr e ET_0 são para intervalos diários de tempo. Quando Tr e ET_0 estão disponíveis para intervalo de tempo maiores do que um dia, a normalização requer cautela. Informações básicas e mais detalhes sobre normalização, inclusive para concentração de CO_2 , são dadas em Steduto et al. (2007).

Alencar (2014) ressalta uma informação importante que embora o AquaCrop use o índice de colheita como parâmetro chave, ele não calcula o particionamento da biomassa em vários órgãos (por exemplo, folhas, raízes etc.). Esta escolha evita lidar com a complexidade e as incertezas associadas aos processos de particionamento, que permanecem entre os menos entendidos na fisiologia das culturas e são mais difíceis de modelar. No AquaCrop, a referência do índice de colheita deve ser fornecida para cada cultura (e cultivar quando tal se justifique).

4.13.1.9. Solo

O solo no modelo AquaCrop é configurado como horizontes variáveis de profundidade, permitindo até cinco camadas diferentes de textura ao longo do perfil, que pode normalmente ser especificado pelo usuário. As diferentes características físicas consideradas são: conteúdo de água no solo na saturação, capacidade de campo (FC) ou o limite superior da capacidade, ponto de murcha permanente (PWP) considerando o limite inferior da capacidade de retenção de água e a condutividade hidráulica de saturação (K_{sat}). Das características mencionadas, o modelo AquaCrop deriva outros parâmetros que regem a ascensão capilar, drenagem interna e percolação profunda, escoamento superficial e evaporação do solo (STEDUTO et al., 2012).

4.13.1.10. Manejo

No modelo AquaCrop, divide-se o manejo em duas categorias principais: manejo de campo e manejo de irrigação. No manejo de campo são considerados três aspectos: fertilidade do solo para o cultivo da cultura, práticas de superfície como *mulch* do solo que reduz a evaporação do solo e o uso de métodos que visem o controle do escoamento superficial e melhora da infiltração.

De acordo com Steduto et al. (2012) os efeitos de fertilidade no crescimento e produtividade na cultura não são diretamente simulados. Em vez disso, o modelo estabelece o ajuste padrão dos parâmetros para várias categorias de fertilidade. Estes ajustes influenciam na CGC, CCx, CC e WP*. Para que os ajustes se tornem mais confiáveis, dados de produção de biomassa e desenvolvimento de dossel observados, obtidos em níveis diferentes de fertilidade, devem ser usados para fazer uma calibração local, tal como previsto no AquaCrop.

No manejo de irrigação são oferecidas opções para avaliar e analisar a produção agrícola e o manejo e uso da água, em condições de chuva ou irrigação. As opções de irrigação incluem a seleção dos métodos de aplicação de água (aspersão, superfície, gotejamento de superfície ou subterrânea), definindo o cronograma, especificando o tempo, a profundidade e a qualidade da água de irrigação de cada aplicação ou pode-se deixar o modelo gerar automaticamente o cronograma com base no intervalo de tempo fixo, profundidade fixa por aplicação ou porcentagem fixa de depleção de água permitida. Uma característica adicional é a estimativa da exigência total de água de uma cultura num determinado clima (STEDUTO et al., 2012).

4.14. Variáveis analisadas

4.14.1. Características físicas do tomate

- (i) *Variáveis de crescimento*: altura da planta (cm), diâmetro do caule (mm) e o tamanho médio máximo da raiz (cm).
- (ii) *Variáveis de produção*: diâmetro transversal do fruto (mm), diâmetro longitudinal do fruto (mm), peso do fruto (g), os números (total, comercial e não-comercial) de frutos por planta, teor de sólidos solúveis (°Brix) do fruto, massa seca total da parte aérea da planta (g), massa seca total dos frutos (g), índice de colheita (%) e as produtividades (total, comercial e não-comercial) (kg/planta).

A coleta de dados em campo da altura da planta (cm) e diâmetro do caule (mm) foi num intervalo de 10 a 11 dias até a proximidade da fase de colheita das primeiras plantas. O diâmetro do caule foi analisado a uma altura de 5 cm do solo com auxílio de um paquímetro digital.

A coleta das informações do tamanho médio máximo da raiz (cm) juntamente com as variáveis de produção foi realizada após o início do período de colheita, destacando duas observações: (i) o tamanho médio máximo da raiz (cm) foi obtido através da média das máximas raízes encontradas na planta e (ii) os frutos foram retirados para as análises seguindo o critério de maturação, evidenciada pela coloração destes frutos.

4.14.2. Variáveis utilizadas no modelo AquaCrop

As variáveis utilizadas como entrada no modelo AquaCrop para a calibração e validação foram:

- (i) *No clima:* dados diários de temperaturas máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidades relativas máxima e mínima do ar (%), precipitação (mm), velocidade do vento (m/s) e radiação solar (W/m^2).
- (ii) *Na cultura:* espaçamento entre plantas (m), espaçamento entre linhas de plantas (m), data da recuperação da planta após transplantio, data da altura máxima do dossel da planta, informação sobre a cobertura máxima do dossel (muito coberta, bastante coberta, bem coberta, quase inteiramente coberta, totalmente coberta), expansão do dossel (muito lenta, lenta, moderada, rápida e muito rápida), declínio do dossel (muito lento, lento, moderado, rápido e muito rápido), data da floração da cultura, data da maturidade, data da senescência, profundidade máxima da raiz (m), a produção de biomassa e o índice de colheita da cultura (%), ressaltando que não considerou-se algumas variáveis que são observadas no início do ciclo da cultura (antes do transplantio).
- (iii) *Na Irrigação:* método de irrigação, data da irrigação, volume aplicado (mm) e qualidade da água (excelente, boa, moderada, ruim e péssima) ou avaliação expressa em condutividade elétrica da água (dS/m).
- (iv) *No solo:* capacidade de campo (%), ponto de murcha permanente (%), tipo de solo, número de horizontes (camadas do solo), percentagem de cobertura do solo por mulch - folhas mortas, galhos, etc. espalhados dentro do plantio - expresso em (%) e profundidade do lençol freático (m).

4.15. Análises estatísticas

As variáveis de crescimento e produção da cultura foram analisadas por meio de ferramentas da estatística descritiva (BUSSAB E MORETTIN, 2007).

Foi realizado a análise de variância (ANOVA) pelo teste F para 5 e 1% de probabilidade na comparação dos tratamentos, sendo as médias significativas comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Aplicou-se também a análise de regressão e coeficiente de determinação (R^2) para o entendimento das respostas da planta aos diversos tratamentos abordados na pesquisa.

4.16. Processo de calibração e validação do AquaCrop

A calibração do AquaCrop foi realizada através da comparação dos valores observados e simulados para as variáveis biomassa total (ton/ha) e produtividade (ton/ha) no tratamento de 100%, ajustando o modelo às diversas informações encontradas e definidas em condição de campo, onde foi possível encontrar os parâmetros adequados às condições locais do município de Campina Grande para o tomateiro.

Após etapa de calibração, realizou-se a validação do modelo que consistiu na comparação dos valores reais observados em condição de campo com aqueles simulados pelo modelo já calibrado, tanto na biomassa total (ton/ha) quanto na produtividade (ton/ha) para os demais tratamentos de 80, 60, 40 e 20% de reposição de água da necessidade hídrica da cultura.

A etapa seguinte foi a análise do desempenho do modelo, através do auxílio dos seguintes indicadores estatísticos, bem conhecidos neste tipo de processo. São eles:

O coeficiente de determinação (R^2), definido por:

$$R^2 = \left[\frac{\sum (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2 \sum (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (21)$$

A raiz do erro quadrado médio (RMSE),

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n_o}} \quad (22)$$

A raiz do erro quadrático médio normalizado (NRMSE),

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n_0}} \cdot 100 \quad (23)$$

O coeficiente de eficiência do modelo Nash-Sutcliffe (EF),

$$EF = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (24)$$

e o índice de acordo de Willmott (d),

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (25)$$

em que:

P_i : Valores simulados pelo AquaCrop;

O_i : Valores observados em campo;

\bar{O} : Média dos valores observados;

n_0 : Número de observações.

Na utilização destes indicadores, é necessário ressaltar a importância ou característica resumida de cada um deles a fim de se ter uma ideia da comparação entre os valores observados em condição de campo com os simulados por modelos. No caso do coeficiente de determinação (R^2), ele determina a contribuição de uma variável na previsão da outra (VIEIRA, 2008), onde quanto maior o valor deste coeficiente, melhor o ajustamento destes dados.

O RMSE é um indicador que exibe valores de 0 a ∞ , considerando bom ajuste para o primeiro valor e desempenho fraco ao se afastar deste valor.

Na interpretação dos valores obtidos pelo NRMSE, a simulação pode ser considerada excelente em caso de valor menor que 10%, bom se estiver entre 10 a menos de 20%, justo entre 20 e 30% e pobre se for acima de 30%.

O Coeficiente de eficiência do modelo Nash-Sutcliffe (EF) é bastante utilizado em diversos ajustes, variando de $-\infty$ a 1, com este último sendo considerado a combinação perfeita dos valores observados e simulados pelo modelo.

Por fim, o índice de acordo de Willmott (d), que tem variação de 0 a 1, onde zero indica nenhuma concordância, ao passo que o valor 1 é considerado concordância perfeita.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise de propriedades físicas do solo

Na Tabela 4 são apresentadas as características físicas do solo do local estudado, na área experimental da EstAgro. Através desta tabela percebe-se que o solo foi classificado como Areia Franca, revelando uma característica que deve ser levada em consideração para o planejamento de irrigação.

Tabela 4. Resumo das propriedades físicas do solo na área experimental

Profundidade (cm)	Granulometria (%)			Classificação textural	Densidade do solo g/cm ³	Densidade de partículas g/cm ³	Porosidade (%)
	Areia	Silte	Argila				
10	79,97	14,04	6,00	Areia Franca	1,29	2,73	52,68
20	81,99	11,02	7,00	Areia Franca	1,26	2,71	53,41
30	83,48	10,53	6,00	Areia Franca	1,34	2,73	51,13
40	82,00	10,52	7,49	Areia Franca	1,33	2,73	51,30
50	82,98	10,53	6,50	Areia Franca	1,36	2,71	49,97
60	82,96	10,54	6,50	Areia Franca	1,43	2,69	46,84
70	84,99	10,02	4,99	Areia Franca	1,49	2,71	45,02

Nota: Os dados quantitativos correspondem a uma média

Quanto à granulometria (%), pode-se perceber predominância de suaves tendências de aumento da concentração de areia (%) e diminuição do silte (%), considerando as profundidades de 10 até 70 cm. Já a argila (%) não apresentou tendência bem definida ao longo da variação destas profundidades. Por fim, as densidades do solo (g/cm³) e partículas (g/cm³) apresentaram pouca variação, diferente da porosidade (%) que predominou uma diminuição com o aumento da profundidade.

Uma das consequências de um solo compactado para uma planta é a dificuldade de desenvolvimento do seu sistema radicular. No caso dos experimentos, mesmo observado um leve aumento desta compactação para as camadas de 10 a 70 cm, não foi considerado motivo de interferência nos resultados finais.

Na granulometria, a classificação do solo em areia franca colaborou para a determinação da irrigação diária pela dificuldade deste solo em reter água por longo intervalo de tempo mediante a alta concentração de areia em todas as camadas. A Tabela 5 exibe um resumo estatístico das características do solo da área experimental, confirmando de forma sintetizada o que foi mencionado nesta pesquisa.

Tabela 5. Análise estatística das características físicas do solo na área de estudo

Medidas estatísticas	Características do solo					
	Granulometria (%)			Densidade do solo g/cm ³	Densidade de partículas g/cm ³	Porosidade (%)
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)			
Média	82,62	11,03	6,35	1,36	2,72	50,05
Mediana	82,98	11,02	6,5	1,34	2,73	51,11
Moda	83,49	11,02	6,5	1,29	2,73	---
Variância	4,32	3,56	0,75	0,01	0,00	8,88
Desvio Padrão	2,08	1,89	0,87	0,08	0,03	2,98
Máximo	85,49	17,05	7,49	1,52	2,77	53,44
Mínimo	76,45	9,02	4,49	1,25	2,65	44,27
Amplitude Total	9,04	8,03	3,00	0,27	0,12	9,17
Tamanho da Amostra	14	14	14	14	14	14

Analizando os valores desta tabela, verificou-se através de uma medida de tendência central (média), na granulometria (%), que a concentração média foi de 82,62% de areia, 11,03% de silte e 6,35% de argila, comprovando a classificação citada anteriormente; já os valores das densidades (g/cm³) do solo e partículas concentraram-se em torno de 1,36 e 2,72, respectivamente, com a porosidade apresentando média de 50,05%.

Ainda de acordo com os resultados desta tabela, foi verificado que todas as variáveis analisadas não tiveram grandes variações ao longo das camadas estudadas, pois os resultados do desvio-padrão mostraram que na granulometria os valores foram: areia (2,08%), silte (1,89%) e argila (0,87%); para as densidades do solo e partículas, os resultados mostraram 0,08 g/cm³ e 0,03 g/cm³, respectivamente, confirmando que praticamente se mantiveram constantes ao longo das profundidades estudadas. A porosidade também apresentou pequena variação (2,98%), que demonstrou uma homogeneidade das propriedades físicas do solo no local estudado.

5.2. Primeiro experimento da cultura do tomateiro realizado no ano de 2016

O primeiro experimento foi conduzido em condição de campo durante os meses de setembro a dezembro de 2016 (período seco).

5.2.1. Análise das características climáticas do local no período seco

Os tratamentos iniciaram após a estabilização da cultura, ou seja, todos os tratamentos receberam a mesma irrigação (100%) da necessidade hídrica da cultura, de modo a garantir um desenvolvimento uniforme das plantas.

Na Figura 13 são apresentados os resultados do comportamento das variáveis meteorológicas do primeiro experimento: temperaturas do ar ($^{\circ}\text{C}$) máxima e mínima, umidades relativas do ar (%) máxima e mínima, velocidade do vento (m/s) e radiação solar (W/m^2), para o local no primeiro experimento de estudo.

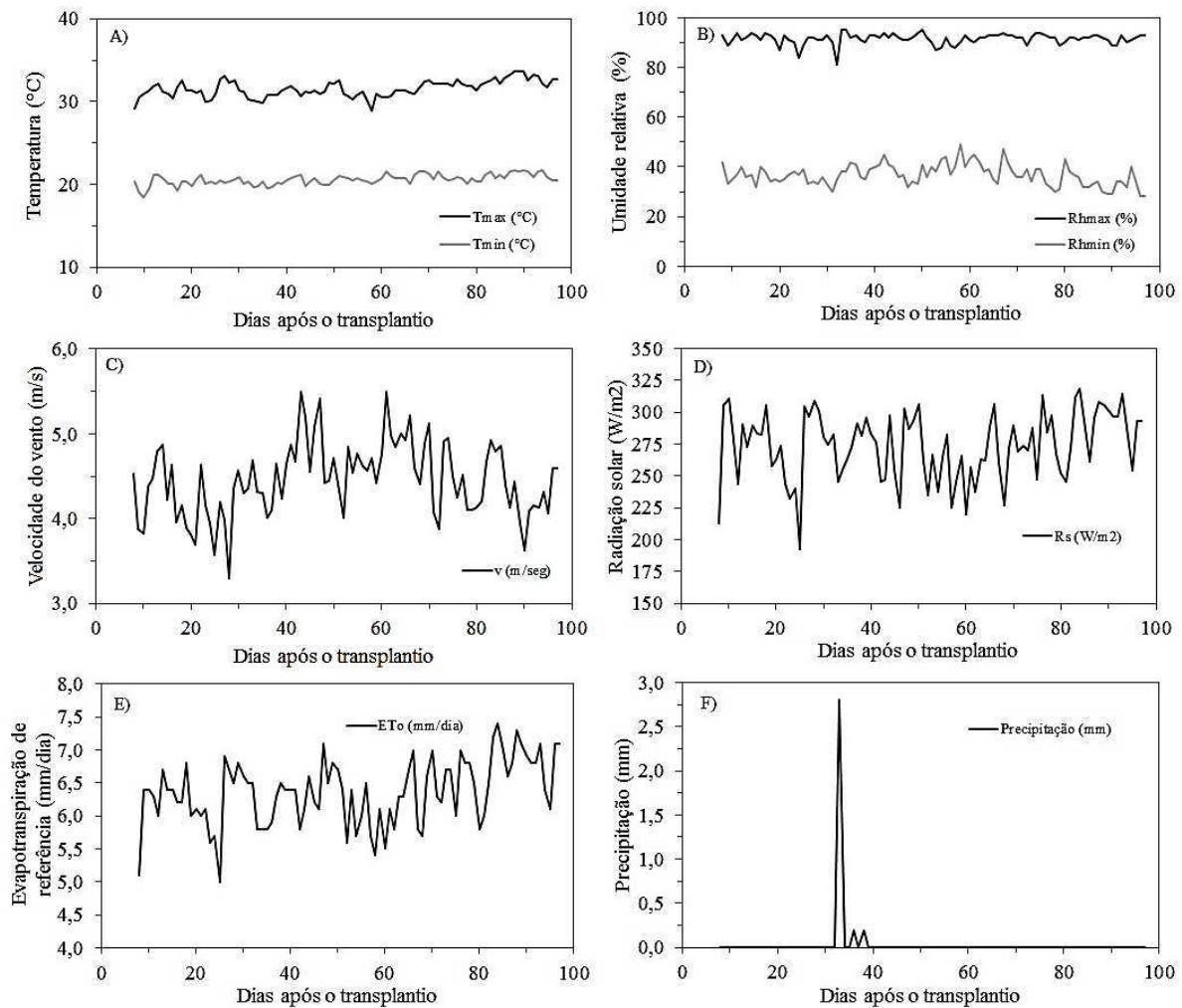


Figura 13. Dados meteorológicos: a) temperaturas do ar ($^{\circ}\text{C}$) máxima e mínima, b) umidades relativas do ar (%) máxima e mínima, c) velocidade do vento (m/s), d) radiação solar (W/m^2), e) evapotranspiração de referência (mm/dia) e f) precipitação pluvial (mm/dia), ocorridos durante a execução do 1º experimento do tomateiro

De acordo com a Figura 13a, pode-se perceber que não houve variação de comportamento destas temperaturas, ou seja, mantiveram-se sem grandes alterações, como era esperado, pois é uma característica da região de estudo nesta época, apresentando média de 20,57 $^{\circ}\text{C}$ e 31,56 $^{\circ}\text{C}$ para as mínimas e máximas. Este resultado demonstrou coerência com o comportamento médio histórico apresentado por Cabral Júnior et al. (2013) para os meses observados neste período. De acordo com Alvarenga (2013) para a produção e desenvolvimento, o tomateiro suporta uma variação ampla de temperatura do ar, de 10 $^{\circ}\text{C}$ a

34°C, que demonstra pelos dados, que possivelmente não ocorreu influência da temperatura local no experimento.

Merece destaque também as umidades relativas do ar (Figura 13b) que apresentaram médias mínimas e máximas de 36,70 e 91,54%, respectivamente. Segundo Alvarenga (2013), o efeito da umidade atmosférica é indireto sobre o desenvolvimento e produção do tomateiro. O autor ressalta ainda que em regiões com alta umidade relativa do ar, ocorre a formação de orvalho, favorecendo a multiplicação de fungos e bactérias, contribuindo para a disseminação de doenças. Já neste período, a precipitação pluvial acumulada foi de apenas 3,20 mm, sendo altamente necessário o uso da irrigação diária para suprir as necessidades hídricas da cultura.

De acordo com Santana et al. (2010) o objetivo principal da irrigação é proporcionar às culturas a quantidade necessária de água para sua produção, sem excesso ou déficit, evitando assim o desperdício. As demais variáveis apresentaram comportamentos semelhantes no período estudado, apresentando médias de 4,45 m/s (medido a 10 m) para a velocidade do vento, 273,60 W/m² de radiação solar e 6,36 mm/dia para a evapotranspiração de referência, este último apresentando, de modo geral, tendência ligeiramente crescente ao longo do experimento.

5.2.2. Demanda hídrica do tomateiro no período seco

As lâminas aplicadas para atender à necessidade hídrica total do tomateiro no período seco (2016) do DAT 8 até o final do estudo (DAT 97) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% foram: 485,5; 388,4; 291,3; 194,2 e 97,1 mm, respectivamente. O resultado encontrado no tratamento de 100% apresentou coerência também com a lâmina total aplicada (100%) por Lima et al. (2017) que, na ocasião, foi de 502,9 mm. Como a precipitação total ocorrida neste período foi muito pequena (3,20 mm), não houve dificuldade de manejo no controle dos tratamentos em todo o experimento.

5.2.3. Variáveis fenométricas do tomateiro analisadas em 2016

5.2.3.1. Variáveis de crescimento para o período seco

A Figura 14 apresenta os comportamentos dos valores médios das características da cultura: altura da planta (cm) e diâmetro do caule (mm) quando submetidos às diferentes aplicações de lâminas de água para o experimento realizado no ano de 2016.

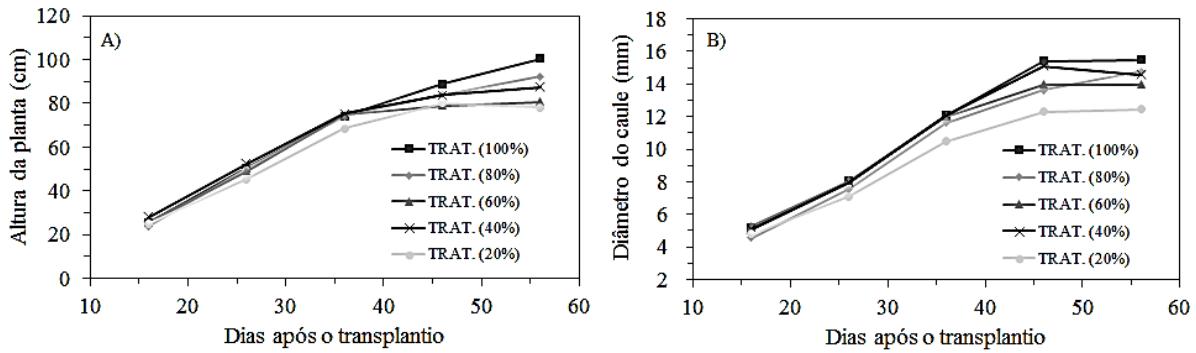


Figura 14. Médias dos valores das variáveis de crescimento: a) altura da planta (cm) e b) diâmetro do caule (mm) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro

Analizando a Figura 14a, pode-se perceber que o comportamento da altura da planta (cm) no tempo exibiu uma tendência linear para os tratamentos de 100 e 80%. Já os tratamentos com reposição de apenas 60, 40 e 20%, provocaram na planta uma diminuição do seu crescimento a partir do DAT 45. De modo geral, o tratamento que resultou na maior altura média do tomateiro foi o de 100% (100,38 cm), com os demais apresentando médias de: 92,25; 80,75; 87,38 e 78,25 cm para os tratamentos de 80, 60, 40 e 20 %, respectivamente. Para o diâmetro do caule, quando submetido ao tratamento de 100%, o valor médio foi de 15,47 mm enquanto que o de 20% apresentou diâmetro médio de 12,46 mm, que demonstra a influência da necessidade hídrica no crescimento da planta ao longo do experimento (Figura 14b).

Analizando-se a variação dos tratamentos para cada dia de coleta de dados da característica altura da planta (cm), a Tabela 6 exibe um resumo da análise de variância (ANOVA) representado pelos valores do teste F com indicação dos respectivos níveis de significância de 5 e 1%, avaliada nos períodos de 16, 26, 36, 46 e 56 dias após o transplantio (DAT).

Tabela 6. Resumo da análise de variância para a variável altura da planta (cm) em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura aos 16, 26, 36, 46 e 56 DAT ocorridos durante a execução do 1º experimento do tomateiro

Fonte de variação	GL	Quadrados médios									
		16 DAT	26 DAT	36 DAT	46 DAT	56 DAT					
Tratamentos	4	9,94	ns	26,61	ns	31,32	ns	58,73	ns	319,02	**
Resíduos	15	7,43		50,51		30,89		21,54		26,48	
Total	19										
CV (%)		10,63		14,38		7,58		5,58		5,86	

* (significativo a 5% de probabilidade pelo teste F)

** (significativo a 1% de probabilidade pelo teste F)

ns (não-significativo)

Analizando-se esta tabela, observa-se que os tratamentos estudados não influenciaram de modo significativo na variável altura da planta (cm) ao longo do período da cultura, com exceção do último dia de coleta (56 DAT), apenas para 1% de probabilidade ($p < 0,01$). Lima et al. (2017) também não encontraram significância estatística para altura das plantas do tomateiro aos 30, 45, 60, e 80 DAT em função das lâminas aplicadas. Segundo o autor, a não diferença entre os tratamentos pode ter ocorrido por motivo de escolha de estabelecer a mesma lâmina de irrigação para todas as plantas nos primeiros 10 DAT, visando o desenvolvimento inicial uniforme.

Na Tabela 7 é apresentada a análise comparativa das médias dos tratamentos aos 56 DAT através do teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 7. Comparação das médias da altura da planta (cm) aos 56 DAT que apresentaram significância estatística no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro

VALORES MÉDIOS	
Tratamentos	Altura da planta (cm)
T1 - 100%	100,38 a
T2 - 80%	92,25 ab
T3 - 60%	80,75 c
T4 - 40%	87,38 bc
T5 - 20%	78,25 c

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade

Os resultados comprovam o que foi evidenciado pela ANOVA anteriormente, ou seja, ocorreu diferenças entre as alturas médias das plantas em função dos tratamentos avaliados, destacando-se que os melhores resultados foram obtidos para o tratamento de 100% (100,38 cm) não ocorrendo diferença significativa entre o tratamento de 80%. Ainda de acordo com a tabela destaca-se que a menor altura de planta foi para o tratamento de 20% da necessidade hídrica da cultura, apresentando média de 78,25 cm.

A Tabela 8 apresenta um resumo da análise de variância para a característica diâmetro do caule (mm) em função dos tratamentos aos 16, 26, 36, 46 e 56 DAT ocorridos durante a execução do 1º experimento do tomateiro.

Tabela 8. Resumo da análise de variância para a variável diâmetro do caule (mm) em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura aos 16, 26, 36, 46 e 56 DAT ocorridos durante a execução do 1º experimento do tomateiro

Fonte de variação	GL	Quadrados médios					56 DAT
		16 DAT	26 DAT	36 DAT	46 DAT	56 DAT	
Tratamentos	4	0,35	ns	0,67	ns	1,87	ns
Resíduos	15	0,44		0,72		0,68	2,09
Total	19						1,75
CV (%)		13,32		10,96		7,10	10,27
							9,28

* (significativo a 5% de probabilidade pelo teste F)

** (significativo a 1% de probabilidade pelo teste F)

ns (não-significativo)

De acordo com a tabela acima, verifica-se pelo teste F que não houve diferenças significativas nos cinco dias de avaliação para o diâmetro do caule (mm). Os resultados foram coerentes novamente com Lima et al. (2017), que na ocasião avaliaram para 30, 45, 60 e 80 DAT concluindo que não houve diferença significativa entre os tratamentos por eles estudados.

5.2.3.2. Variáveis de produção para o período seco

Analisou-se os valores médios das variáveis de produção: peso do fruto (g), diâmetro transversal do fruto (mm), diâmetro longitudinal do fruto (mm) e número de frutos por planta para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% cujos resultados encontram-se na Figura 15.

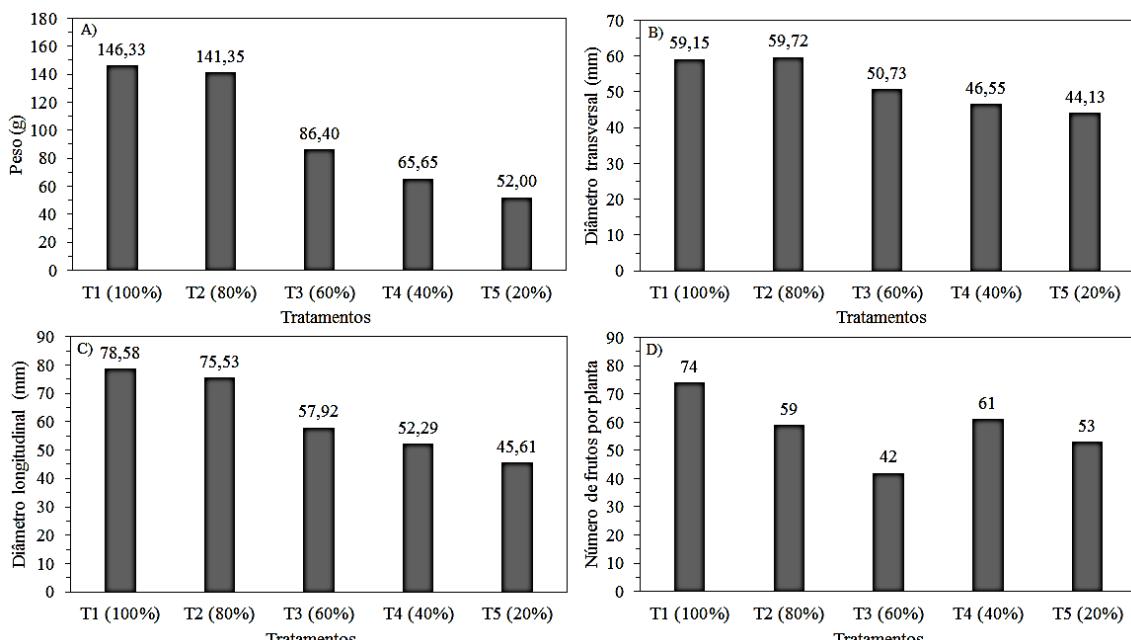


Figura 15. Médias dos valores das variáveis de produção: a) peso do fruto (g), b) diâmetro transversal do fruto (mm), c) diâmetro longitudinal do fruto (mm) e d) número de frutos por planta, para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro

A Figura 15a evidencia que o resultado encontrado em relação ao peso médio do tomate foi maior (146,33 g) para o tratamento de 100% e menor (52,00 g) para o tratamento de 20%. Ainda segundo a Figura 15a, os tratamentos de 100 e 80% apresentaram pesos bem semelhantes e maiores que os demais. A Figura 15b exibe a média dos diâmetros transversais (mm) de todos os tratamentos, mostrando ocorrer leve diferença entre os tratamentos, merecendo destaque para a reposição 80%, que apresentou diâmetro médio de 59,72 (mm), sendo este o maior, e o de 20% apresentando diâmetro médio de 44,13 mm, o menor. O mesmo não ocorreu com o diâmetro longitudinal (Figura 15c), pois a figura evidencia que os tratamentos de 100% (78,58 mm) e 80% (75,53 mm) apresentaram valores próximos e superiores aos demais, principalmente comparado com a menor lámina de água aplicada (20%), com diâmetro longitudinal médio de 45,61 mm. O número de frutos por planta (Figura 15d) apresentou a maior média, de 74 frutos para o tratamento de 100% e apenas 42 frutos para o tratamento de 60%, este último provocado pela pouca produtividade observada em um dos canteiros utilizados neste tratamento para o período seco.

As mesmas variáveis foram analisadas por meio da análise de regressão visando obter respostas também sobre possíveis relações em função do comportamento (ou variação) das láminas de água aplicadas no 1º experimento, onde os ajustes são exibidos na Figura 16.

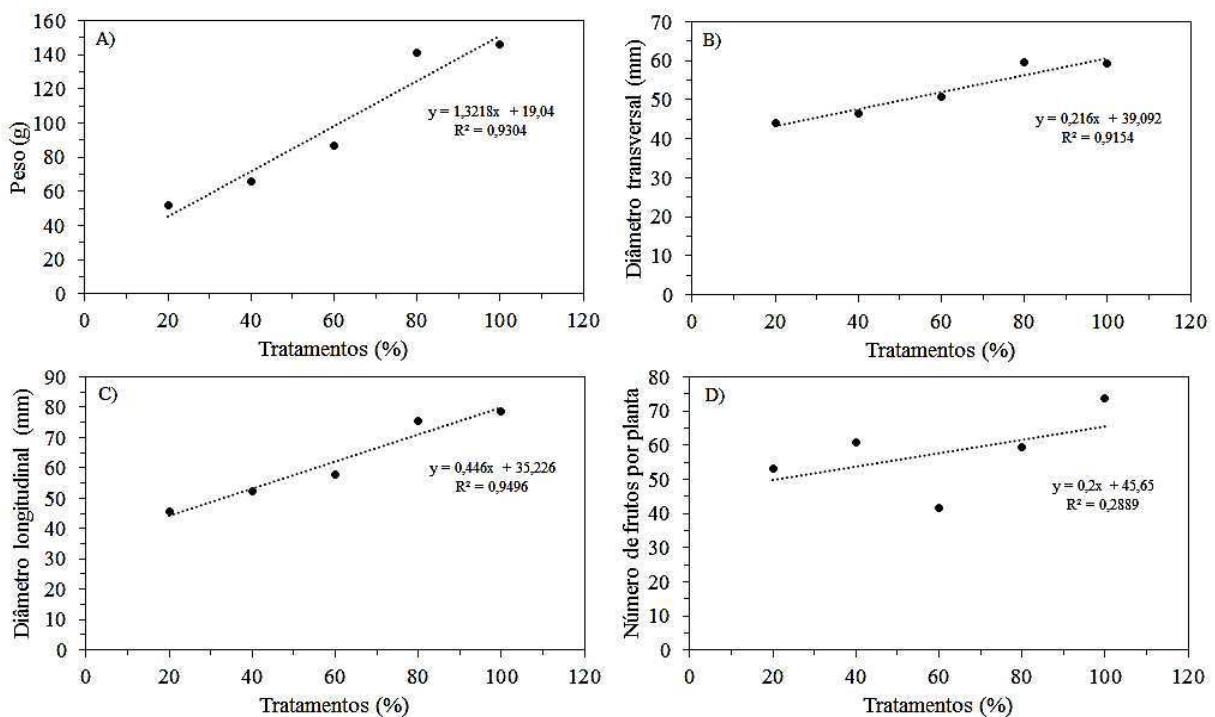


Figura 16. Equações de regressão para os valores médios das variáveis de produção a) peso do fruto (g), b) diâmetro transversal do fruto (mm), c) diâmetro longitudinal do fruto (mm) e d) número de frutos por planta em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro

De acordo com as Figuras 16a, b e c, acima exibidas, verificam-se que as variáveis analisadas apresentaram ajustes lineares, apresentando uma relação positiva, ou seja, à medida que aumentaram as lâminas de água, também aumentaram as médias do peso (g), diâmetro transversal (até o tratamento de 80%) (mm) e o diâmetro longitudinal (mm). O número médio de frutos não apresentou boa relação em função do aumento dos tratamentos (Figura 16d). Santana et al. (2010) encontraram ajustes quadráticos para a produtividade e número de frutos por planta, onde encontraram tendência de aumento das variáveis até aproximadamente 500 mm/ciclo com posterior decréscimo. De acordo com os autores, dessa forma, lâminas menores ou maiores ocasionam perdas de produtividade, em relação à reposição de 100%.

No caso desta pesquisa, o ajuste linear foi escolhido pelo motivo da faixa de variação de lâminas apresentar limite de 100%, o que de certa maneira evidencia que a variação de 20 até 100% está ligeiramente correlacionada positivamente com o número de frutos produzidos por planta. Além disso, os resultados do ajuste pelo modelo linear não apresentaram grandes diferenças comparado com o quadrático. Ainda de acordo com a Figura 16d, o fato do resultado encontrado no tratamento de 60% ser abaixo dos demais, pode ser explicado por uma provável influência local (diferentes características físico-químicas do solo em um dos canteiros) no resultado final, que não apresentou coerência com a tendência de ajuste entre os demais tratamentos de 100, 80, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura.

Mas como o principal intuito é verificar as diferenças destes tratamentos nas características do fruto do tomateiro, a Tabela 9 exibe um resumo da análise de variância para as quatro variáveis mencionadas, nos níveis de 5 e 1% de probabilidade, em função das lâminas 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura determinadas no experimento para o período seco. O teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 10) foi utilizado na identificação das diferenças entre as médias, para o caso de significância do teste F obtida na ANOVA.

Tabela 9. Resumo das análises de variância para as variáveis de produção: a) peso do fruto (g), b) diâmetro transversal do fruto (mm), c) diâmetro longitudinal do fruto (mm) e d) número de frutos por planta para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro

Fonte de variação	GL	Quadrados médios				
		Peso (g)	Diâmetro transversal (mm)	Diâmetro longitudinal (mm)	Nº de frutos	
Tratamentos	4	7511,02 **	203,96 **	837,93 **	553,83 **	
Resíduos	15	554,08	16,69	64,48	72,48	
Total	19	---	---	---	---	
CV (%)	---	23,94	7,85	12,95	14,77	

* (significativo a 5% de probabilidade pelo teste F)

** (significativo a 1% de probabilidade pelo teste F)

ns (não-significativo)

Tabela 10. Comparação das médias das variáveis de produção que apresentaram significância estatística no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro

Tratamentos	VALORES MÉDIOS			
	Peso do fruto (g)	Diâmetro transversal (mm)	Diâmetro longitudinal (mm)	Número de frutos
T1 - 100%	146,33 a	59,15 ab	78,58 a	74 a
T2 - 80%	141,35 a	59,72 a	75,53 a	59 abc
T3 - 60%	86,40 b	50,73 bc	57,92 b	42 c
T4 - 40%	65,65 b	46,55 c	52,29 b	61 ab
T5 - 20%	52,00 b	44,13 c	45,61 b	53 bc

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade

De acordo com a Tabela 9, pode-se perceber diferenças significativas dos tratamentos nas variáveis: peso (g), diâmetro transversal (mm), diâmetro longitudinal (mm) e o número de frutos por planta, comprovando que diferentes lâminas de irrigação influenciam diretamente na produtividade final.

De acordo com a comparação de médias (Tabela 10) em todas as variáveis, é importante destacar que o tratamento de 100% apresentou maior valor para o peso (g), diâmetro longitudinal (mm) e número de frutos, enquanto que o diâmetro transversal (mm) apresentou sua superioridade na lâmina de reposição de 80%.

No 1º experimento foi observado uma alta incidência de frutos com podridão apical em alguns tratamentos. Segundo Alvarenga (2013) esta doença fisiológica denominada podridão apical ou podridão estilar é provocada pela deficiência de cálcio, onde outros fatores de estresse como deficiência hídrica e excesso de sais também contribuem para a ocorrência desta anormalidade. Ainda de acordo com o autor, fatores que intensificam a transpiração foliar

(crescimento vegetativo excessivo), principalmente durante a frutificação, causam aumento também da incidência da podridão apical.

Por isso, considerou-se nos resultados obtidos o número de frutos aptos ao consumo, denominado aqui de número de frutos comerciais (NFC) e os que não são aptos, denominado número de frutos não-comerciais (NFNC), ocorrendo a separação de todos os frutos produzidos pelo tomateiro dos frutos que apresentaram podridão apical, popularmente chamado de “*fundo preto*”.

A Tabela 11 exibe o resumo da análise de variância tanto para os comerciais, aqui definido deste modo, como para os considerados não-comerciais que apresentaram este problema.

Tabela 11. Resumo das análises de variância para as variáveis de produção: número de frutos comerciais (NFC) e número de frutos não-comerciais (NFNC) em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro

Fonte de variação	GL	Quadrados médios		
		NFC	NFNC	
Tratamentos	4	2821,75	**	1571,20
Resíduos	15	119,67		160,25
Total	19	---		---
CV (%)	---	31,25		55,89

* (significativo a 5% de probabilidade pelo teste F)

** (significativo a 1% de probabilidade pelo teste F)

ns (não-significativo)

Pela Tabela 11 observa-se que ocorreu significância estatística dos tratamentos tanto no número de frutos comerciais quanto dos não-comerciais.

A Tabela 12 apresenta o resultado do teste de Tukey para a comparação múltipla de médias ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 12. Comparação das médias para as variáveis: número de frutos comerciais e número de frutos não-comerciais que apresentaram significância estatística no Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 1º experimento do tomateiro

Tratamentos	VALORES MÉDIOS	
	NFC	NFNC
T1 - 100%	70 a	4 c
T2 - 80%	55 a	4 c
T3 - 60%	22 b	20 bc
T4 - 40%	23 b	38 ab
T5 - 20%	5 b	48 a

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade

De acordo com a Tabela 12, para o número de frutos comerciais, percebe-se que os tratamentos de 100 e 80% não apresentaram significância estatística, apresentando médias de produtividade de 70 e 55 frutos comerciais por planta, respectivamente. Os demais tratamentos não apresentaram significância com médias de 22, 23 e 5 frutos por planta, para as reposições de 60, 40 e 20%, respectivamente. Pode-se concluir que o aumento da lâmina de água aplicada está diretamente relacionado ao aumento do número de frutos comerciais, ressaltando-se para uma faixa de variação de 20 a 100% da água requerida pela planta, mostrando que a lâmina ideal foi a de 100%, no entanto, 80% apresentou resultado favorável para execução de experimentos com tomateiro.

Quando retrata-se ao caso de frutos não-comerciais, percebe-se uma situação inversa, ou seja, a medida que aumentou a lâmina de água necessária para o tomateiro, ocorreu diminuição do número de frutos com podridão apical, onde a maior média de frutos correspondeu ao tratamento de apenas 20% de reposição de água, com produtividade de 48 frutos por planta com esta anormalidade. Ressalta-se ainda que as menores médias ficaram com os tratamentos de 80 e 100%, com apenas 4 frutos por planta com podridão apical. Pulupol et al. (1996) conduziram tratamentos em déficit e verificaram redução no crescimento de plantas, produtividade, tamanho e peso dos frutos, e incidência de podridão apical.

Merece destaque importante neste tema abordado, pois a podridão apical é relacionada principalmente à deficiência de cálcio para a planta. No presente estudo, a deficiência de cálcio foi consequência da deficiência hídrica, estabelecida às menores reposições de água, visto que a adubação foi homogênea para todos os canteiros analisados. No entanto, esta anormalidade pode também ocorrer em meio ao excesso de aplicações de lâmina de irrigação. Segundo Fontes (2003) a deficiência de cálcio é afetada por vários fatores, dentre eles o desbalanço de água no solo. Alguns autores encontraram aumento da incidência de podridão apical com aumento de lâminas de irrigação. Por exemplo, Campagnol et al. (2014) estudando lâminas de 60, 80, 100, 120 e 140% da ETc, observaram a ocorrência de diminuição da incidência de podridão apical com a redução da lâmina de irrigação até a lâmina de 80%. Segundo os autores, como a quantidade de cálcio aplicada foi igual para todos os tratamentos, isso provavelmente resultou em maior diluição desse nutriente nas maiores lâminas de irrigação, resultando em menor translocação de cálcio para os frutos do tomateiro e, por consequência, maior incidência de podridão apical.

Portanto, a explicação aqui abordada para esta anormalidade em função dos tratamentos é que tanto a deficiência hídrica como o excesso de água para as plantas, ocasionam diminuição de cálcio absorvido pelo tomateiro. No experimento atual, embora a quantidade de cálcio foi

homogênea para todos os tratamentos analisados, a pouca quantidade de água inserida nos canteiros para as plantas não promoveu uma diluição ideal deste nutriente para a planta, ocasionando assim, maiores incidências de frutos com podridão apical nos menores tratamentos (20 e 40%).

5.3. Segundo experimento da cultura do tomateiro realizado no ano de 2017

O segundo experimento foi conduzido em condição de campo durante os meses de março a junho de 2017 (período chuvoso).

5.3.1. Análise das características climáticas do local no período chuvoso

O segundo experimento da cultura, realizado no ano de 2017, apresentou comportamento um pouco diferente por se tratar do início do período chuvoso na região, conforme resultados apresentados na Figura 17.

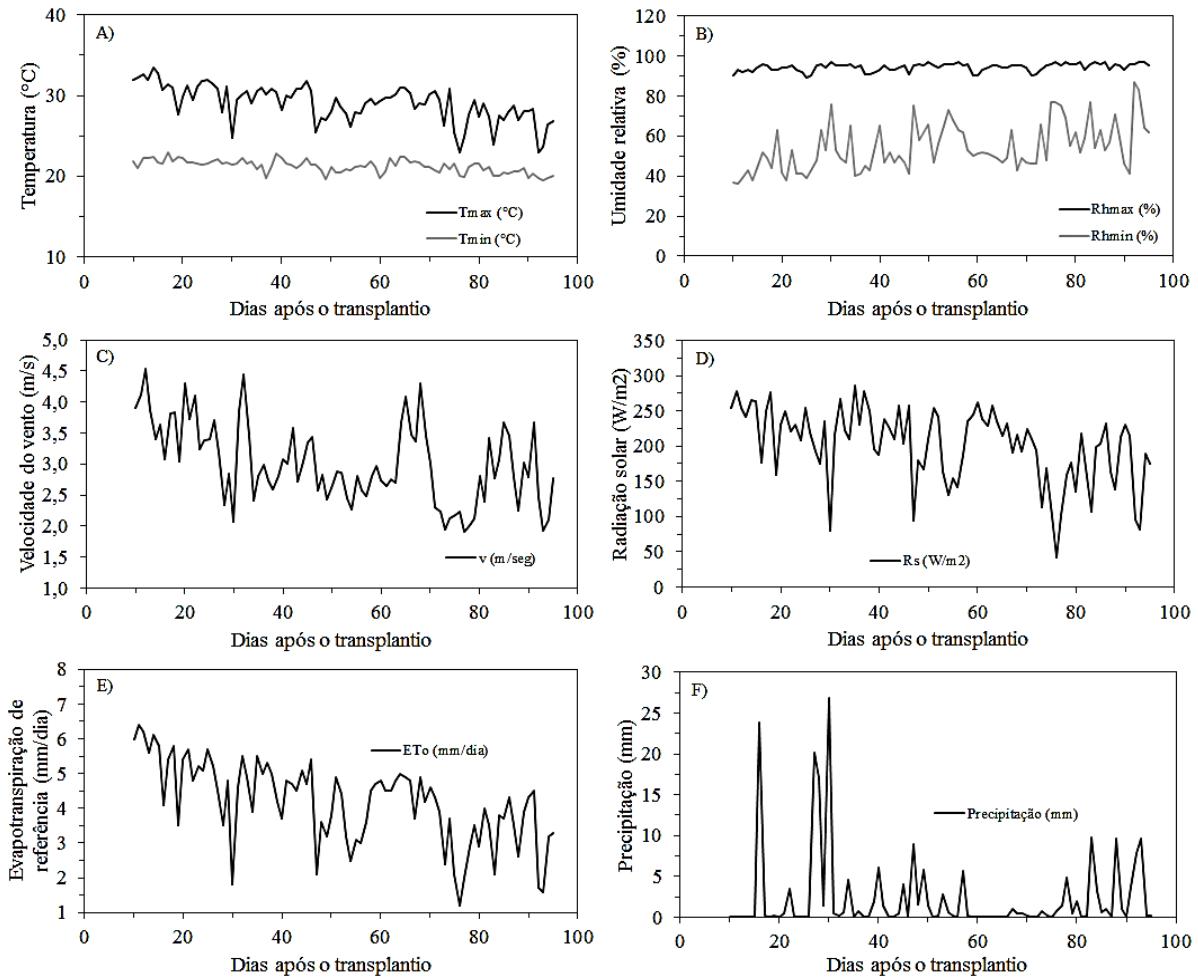


Figura 17. Dados meteorológicos: a) temperaturas do ar ($^{\circ}\text{C}$) máxima e mínima, b) umidades relativas do ar (%) máxima e mínima, c) velocidade do vento (m/s), d) radiação solar (W/m^2), e) evapotranspiração de referência (mm/dia) e f) precipitação pluvial (mm/dia), ocorridos durante a execução do 2º experimento do tomateiro

De acordo com a Figura 17a as temperaturas mínimas e máximas apresentaram ao longo da série comportamento ligeiramente decrescente, com médias de 21,22 $^{\circ}\text{C}$ e 29,07 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Ainda de acordo com a figura, nota-se uma variação maior na temperatura máxima. Pela Figura 17b também observa-se um comportamento diferente das umidades relativas do ar, onde neste caso, a variação temporal nítida se deu na umidade relativa mínima do ar (%), cuja média ficou em torno de 54,27%, enquanto que a máxima apresentou média de 94,30%.

As demais variáveis meteorológicas apresentaram variações nítidas, com médias de 3,01 m/s (medido a 10 m) para a velocidade do vento, 202,07 W/m^2 de radiação solar e 4,18 mm/dia para a evapotranspiração de referência. Por fim, a precipitação pluvial acumulada foi de 200,60 mm neste período.

5.3.2. Demanda hídrica do tomateiro no período chuvoso

No período chuvoso (2017) as lâminas totais aplicadas do DAT 10 até o final do estudo (DAT 95) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% foram: 309,1; 247,3; 185,5; 123,7; e 61,8 mm, respectivamente. Neste experimento, o período mais instável das variáveis meteorológicas, destacando a precipitação total ocorrida (200,60 mm), pode ter influenciado em alguns resultados finais de algumas variáveis estudadas no tomateiro em razão das diferentes lâminas de irrigação aplicadas para os tratamentos. Campagnol et al. (2014) tiveram problemas na execução do experimento também em função do manejo das lâminas de irrigação com a ocorrência de precipitação de 382,5 mm ao longo do experimento estudado por eles. Segundo os autores, os resultados podem ter sido afetados pela precipitação ocorrida ao longo do cultivo, principalmente no final do experimento, onde representou 57,19% do total para o período de 1 de novembro a 5 de dezembro, equivalente a 35 dias. Ainda de acordo com os autores, houve pouca aplicação de água via fertirrigação, que dificultou a manutenção das diferenças entre as lâminas de irrigação.

5.3.3. Variáveis fenométricas do tomateiro analisadas em 2017

5.3.3.1. Variáveis de crescimento para o período chuvoso

A Figura 18 exibe os comportamentos dos valores médios da altura da planta (cm) e diâmetro do caule (mm) realizados no 2º experimento no ano de 2017.

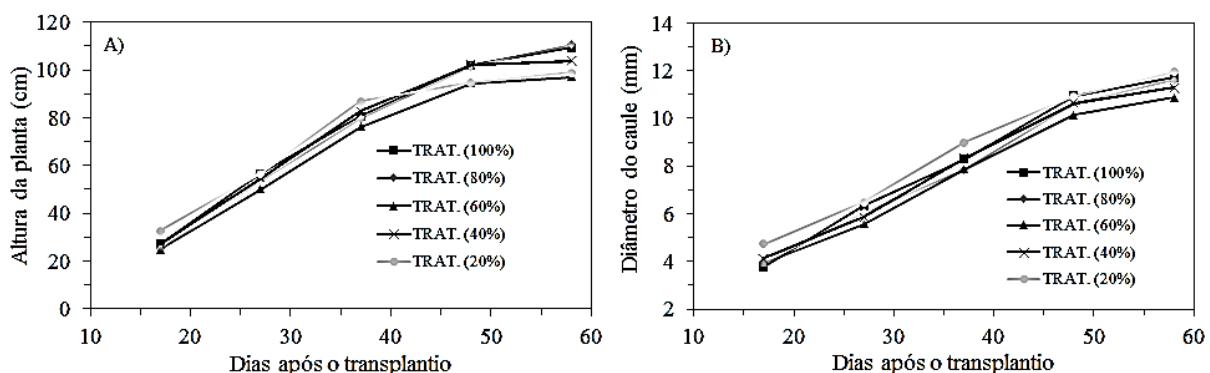


Figura 18. Médias dos valores das variáveis de crescimento: a) altura da planta (cm) e b) diâmetro do caule (mm) para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 2º experimento do tomateiro

Nesta figura é possível observar que todos os tratamentos apresentaram comportamentos semelhantes, demonstrando que neste período a precipitação ocasionou uma homogeneidade de crescimento de todas as plantas. Porém, a altura da planta (Figura 18a) a partir do DAT 50 tende a se comportar de acordo com o 1º experimento, ou seja, as maiores alturas para os tratamentos de 100 e 80%.

O tratamento que apresentou maior altura média do tomateiro no período de coleta de dados foi o de 80% (110,50 cm) e a menor média para 60% (97,00 cm). Já o destaque importante na Figura 18b foi o diâmetro do caule no tratamento de 20%, que superou o de 100%, com valor médio de 11,94 mm, enquanto que o de 60% apresentou menor diâmetro médio, com 10,89 mm. Um possível motivo destes resultados encontrados está no fato da dificuldade de manejo de experimentos em campo aberto no período chuvoso, principalmente no que se refere à reposição de água controlada para a planta, principalmente nos menores tratamentos (40 e 20%).

A Tabela 13 exibe um resumo da altura da planta (cm) avaliada nos períodos de 17, 27, 37, 48 e 58 DAT por meio da análise de variância (ANOVA) e aplicação do teste F aos níveis de 5 e 1% de probabilidade, para o 2º experimento.

Tabela 13. Resumo da análise de variância para a variável altura da planta (cm) em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura aos 17, 27, 37, 48 e 58 DAT ocorridos durante a execução do 2º experimento do tomateiro

Fonte de variação	GL	Quadrados médios				
		17 DAT	27 DAT	37 DAT	48 DAT	58 DAT
Tratamentos	4	39,29	ns	30,19	ns	61,67
Resíduos	15	25,27		43,04		38,06
Total	19					
CV (%)		18,35		12,06		7,60
						6,28
						7,49

* (significativo a 5% de probabilidade pelo teste F)

** (significativo a 1% de probabilidade pelo teste F)

ns (não-significativo)

De acordo com esta tabela observa-se que os tratamentos não ocasionaram diferenças significativas para a altura da planta (cm) no 2º experimento. Dos diversos motivos que podem ter comprometido o resultado destacam-se as ocorrências constantes de precipitação no 2º experimento, o maior período destinado à estabilização das plantas mediante um problema ocorrido na etapa de adubação, além de outros fatores que podem ter influenciado o comportamento desta variável em todo o desenvolvimento da pesquisa neste período chuvoso. Diferentemente desta pesquisa, Kalungu (2008) encontrou que as lâminas de irrigação equivalentes a 50, 75, 100 e 125% da necessidade hídrica da cultura tiveram efeito significativo

sobre a altura das plantas aos 20, 40, 60, 80 e 90 DAT ao nível de 5% de probabilidade, sugerindo que a água foi um fator importante para o crescimento da cultura.

A Tabela 14 também exibe o resumo da análise de variância para o diâmetro do caule (mm) avaliado no 2º experimento.

Tabela 14. Resumo da análise de variância para a variável diâmetro do caule (mm) em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura aos 17, 27, 37, 48 e 58 DAT ocorridos durante a execução do 2º experimento do tomateiro

Fonte de variação	GL	Quadrados médios				
		17 DAT	27 DAT	37 DAT	48 DAT	58 DAT
Tratamentos	4	0,54	ns	0,55	ns	0,86
Resíduos	15	0,51		0,44		0,62
Total	19					
CV (%)		17,36		10,93		9,49
					7,92	8,03

* (significativo a 5% de probabilidade pelo teste F)

** (significativo a 1% de probabilidade pelo teste F)

ns (não-significativo)

Através desta Tabela 14, verifica-se também que não ocorreu significância estatística em nenhum dos dias analisados, demonstrando que a variação de lâminas de 20 a 100% de reposição de água não influenciaram significativamente na variação deste diâmetro. Ressalta-se que, neste estudo, avaliou-se apenas a variação crescente de lâminas, onde o limite foi de 100%. De acordo com Soares et al. (2011) pode-se dizer que o diâmetro do caule é uma variável pouco sensível ao estresse hídrico, não sendo indicada para estudos de tolerância do tomateiro.

Diversos autores estudaram o diâmetro do caule para o tomateiro em diversas finalidades, confirmando a importância desta informação (FERNANDES et al., 2004; GOMES JÚNIOR et al., 2011; GUEDES et al., 2015).

No acompanhamento de uma cultura, é de extrema importância o estudo do desenvolvimento do seu sistema radicular, pois através desta informação, pode-se tentar entender acerca do que acontece com a planta em decorrência de variações na umidade do solo e como se desenvolve este sistema radicular em condição de deficiência hídrica.

A Figura 19 apresenta o tamanho médio máximo da raiz (cm) dos tomateiros para os cinco tratamentos juntamente com o ajuste de regressão em função destas lâminas após o transplantio da cultura para o 2º experimento de campo.

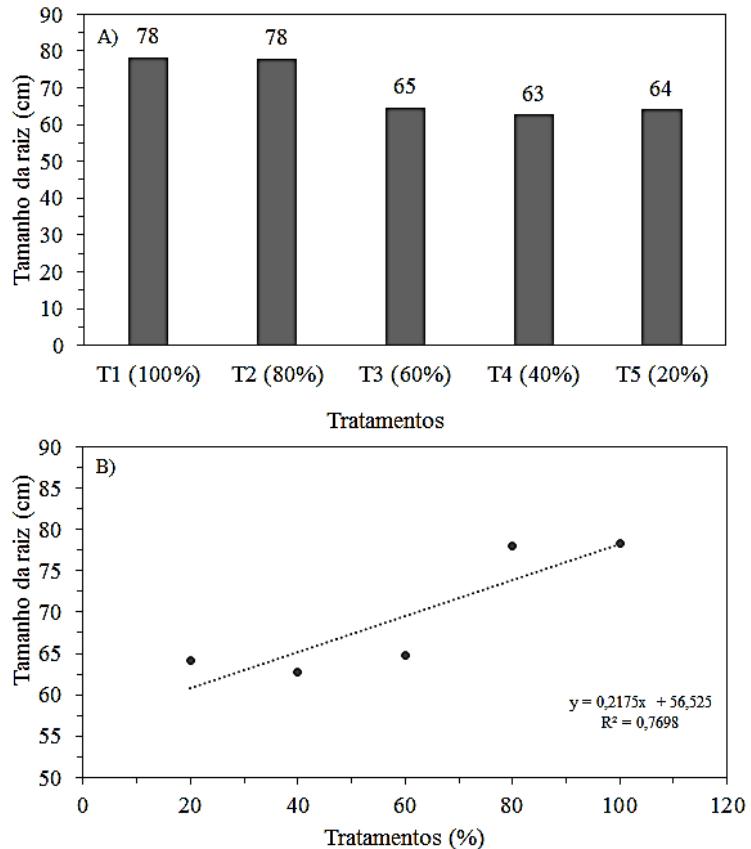


Figura 19. Raízes do tomateiro: a) tamanho médio máximo da raiz (cm) e b) ajuste da equação de regressão em função das lâminas de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição de água pela necessidade hídrica do tomateiro realizado na execução do 2º experimento

Através da Figura 19a, percebe-se uma divisão nítida de dois grupos, ou seja, um composto pelos tratamentos de 100 e 80% e o outro pelos demais tratamentos. O valor médio máximo da raiz foi de 78 cm (100 e 80%) e o mínimo de 63 cm para o tratamento de 40%, comprovando que a quantidade de água é essencial para o desenvolvimento radicular do tomateiro. Segundo Alvarenga (2013) a raiz principal ou pivotante pode alcançar 1,5 m de profundidade, desde que não haja interrupções, como acontece nos transplantes de mudas. Quando isso acontece, as raízes secundárias desenvolvem-se de maneira rápida, tornando-se mais ramificadas e superficiais. Ainda de acordo com o autor, nesse caso, as raízes podem se desenvolver superficialmente até um diâmetro de 1,5 m e alcançar uma profundidade superior a 0,50 m.

De acordo com a Figura 19b, observa-se que o ajuste da equação linear para o tamanho médio máximo da raiz (cm) em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica do tomateiro resultou em um coeficiente de determinação (R^2) aproximadamente de 77%. Ainda de acordo com a referida figura, percebe-se um comportamento desta variável crescente a partir do tratamento de 40%, possibilitando concluir

que à medida que se aumentou a reposição de água, também ocorreu aumento do tamanho médio máximo das raízes.

5.3.3.2. Variáveis de produção para o período chuvoso

Na Figura 20 encontram-se os resultados do comportamento médio dos valores das variáveis de produção: peso do fruto (g), diâmetro transversal do fruto (mm), diâmetro longitudinal do fruto (mm) e número de frutos por planta para os 5 tratamentos (100, 80, 60, 40 e 20%) de reposição de água da necessidade hídrica da cultura no segundo experimento, realizado em 2017.

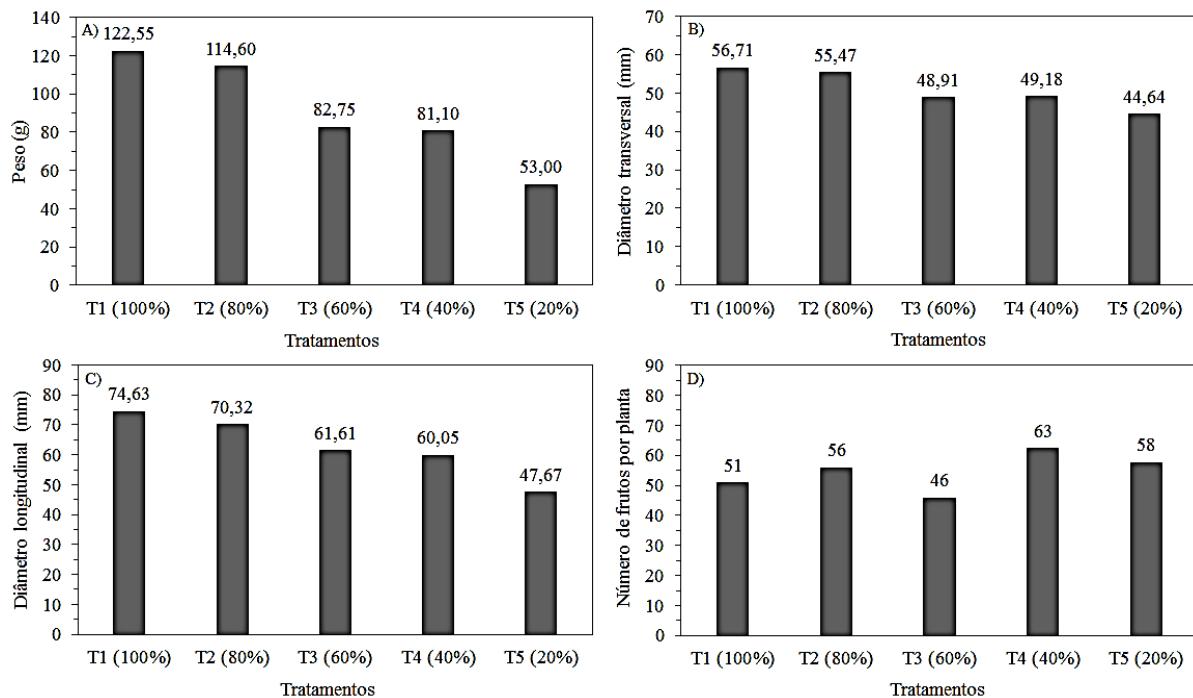


Figura 20. Médias dos valores das variáveis de produção: a) peso do fruto (g), b) diâmetro transversal do fruto (mm), c) diâmetro longitudinal do fruto (mm) e d) número de frutos por planta, para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 2º experimento do tomateiro

Através da Figura 20a é possível verificar novamente pelas médias que o tratamento que mais se destacou foi o de 100% (122,55 g) e o menor de 20% (53,00 g), que demonstra uma grande diferença decorrente da variação de reposição de água. De um modo geral, apresentaram comportamento semelhantes ao 1º experimento, ou seja, os dois tratamentos (100 e 80%) são maiores que os demais. O diâmetro transversal (Figura 20b) também apresentou maior e menor valor médio para os tratamentos de 100% (56,71 mm) e 20% (44,64 mm), respectivamente.

Este comportamento também foi notório na Figura 20c em que o tratamento de 100% (74,63 mm) apresentou diâmetro longitudinal médio superior aos demais e, principalmente, ao menor (20%), ficando em torno de 47,67 mm. Por fim, merece destaque também a Figura 20d, que apresentou maior valor no número médio de frutos por planta (63) no tratamento de 40%, não sendo muito diferente aos demais tratamentos, que demonstra certa homogeneidade ocasionada pela influência do período chuvoso em todos os tratamentos analisados.

As características citadas anteriormente foram também analisadas por meio da análise de regressão visando confirmar ou não possíveis relações em função do comportamento (ou variação) das lâminas de água aplicadas no 2º experimento. Aumentou-se também informações do teor de sólidos solúveis (°Brix) dos frutos para todos os tratamentos analisados, cujos resultados são exibidos na Figura 21.

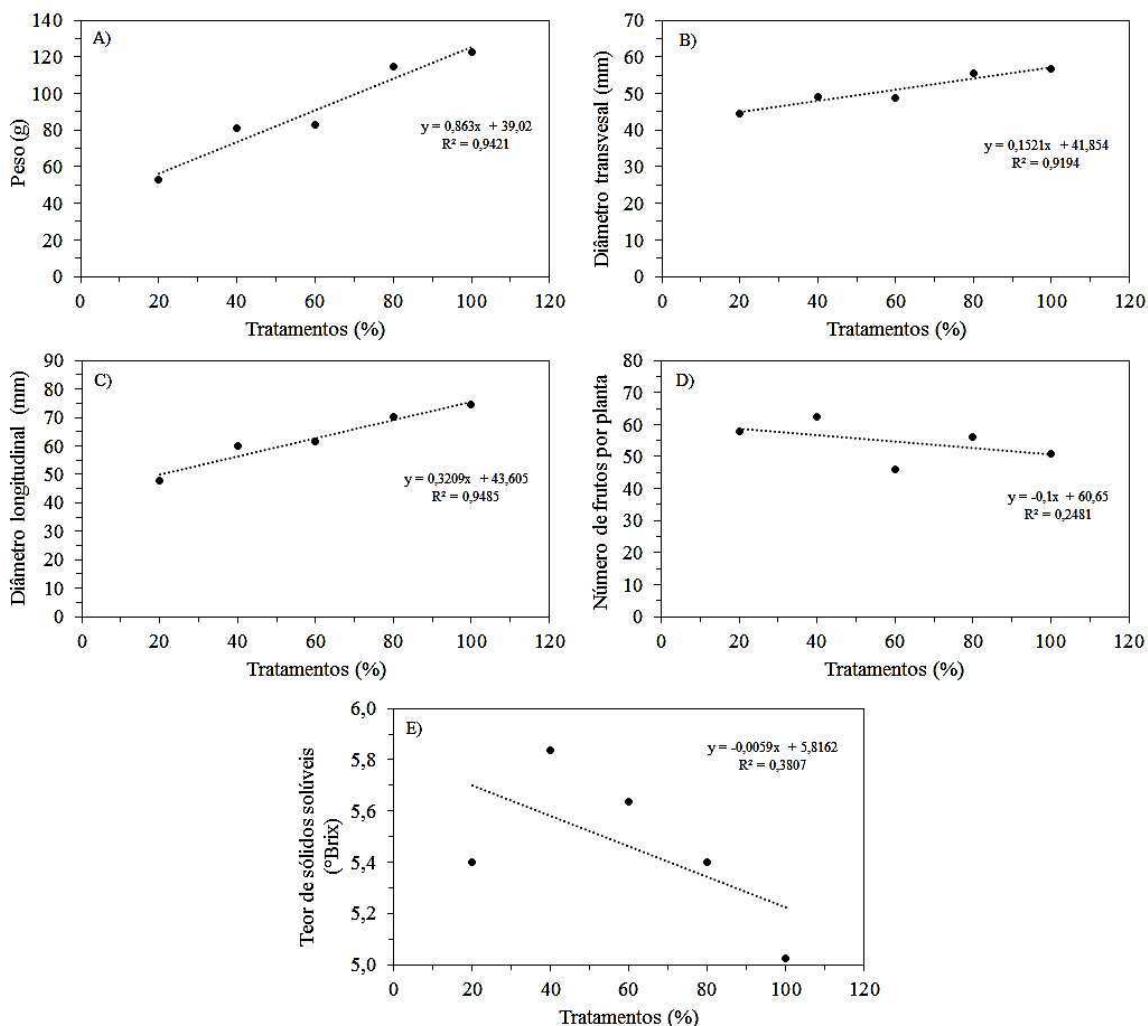


Figura 21. Equações de regressão para os valores médios das variáveis de produção a) peso do fruto (g), b) diâmetro transversal do fruto (mm), c) diâmetro longitudinal do fruto (mm), d) número de frutos por planta e e) teor de sólidos solúveis (°Brix) dos frutos em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 2º experimento do tomateiro

De acordo com as Figuras 21a, b e c, verificam-se novamente que o peso e os diâmetros transversais e longitudinais apresentaram ajustes lineares, mostrando uma relação positiva, ou seja, à medida que aumentou as lâminas de água, também houve aumento das médias do peso, diâmetro transversal (com exceção da faixa de 40 a 60%) e o diâmetro longitudinal. Já os valores médios do número de frutos (Figura 21d) e o teor de sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$) (Figura 21e), coletados ao final do experimento, não apresentaram bons ajustes lineares. De acordo com a Figura 21d, percebe-se que o resultado de ajuste apresentado para o número de frutos por planta foi inverso ao estabelecido no primeiro experimento, ou seja, neste caso o ajuste foi linear negativo, mostrando que o aumento da lâmina, no geral, ficou razoavelmente correlacionado com a diminuição média desta característica.

Ainda de acordo com a Figura 21d, como a localização na área experimental em relação aos tratamentos estabelecidos foi a mesma para ambos os experimentos, possivelmente ocorreu influência local (diferentes características físico-químicas do solo em um dos canteiros) neste tratamento de 60%, resultando numa redução na quantidade média final de frutos por planta, apresentada nesta análise. Uma abordagem interessante merece ser destacada nesta pesquisa. Buscando conhecer o comportamento da quantidade de frutos em função de lâminas de irrigação, autores como Santana et al. (2010) analisaram as lâminas de 70, 100, 130, 160 e 190% e Silva et al. (2013) de 33, 66, 100, 133 e 166%, cada qual em seus objetivos. No entanto, ambos ajustaram equações quadráticas para esta variável. Ao fazer isso, os autores encontraram um ponto (quantidade de irrigação por ciclo e lâmina aplicada) que maximizasse esta quantidade de frutos por planta, com posterior decréscimo desta produtividade. O que acontece é que fatores externos como pragas, doenças, desequilíbrio de adubação, dentre outros podem ter influenciado no resultado final desta pesquisa. Mas, como a quantidade de precipitação total no 2º experimento (200,6 mm) foi considerável, ela pode ter aumentado a quantidade de água fornecida para a planta, ocasionando elevação brusca de lâminas aplicadas, principalmente às de 80 e 100% que, consequentemente, provocou o declínio desta produtividade como encontrado pelos autores, ressaltando que ambos analisaram lâminas maiores que 100%, que não foi o caso da presente pesquisa.

Por meio da Figura 21e, onde encontra-se a média do teor de sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$) dos frutos em função da variação das lâminas de irrigação, observa-se que o ajuste linear negativo proporcionou coeficiente de determinação de 38,07%. A maior média foi para o tratamento de 40% (5,84 $^{\circ}\text{Brix}$) e a menor média foi para a lâmina de 100% (5,03 $^{\circ}\text{Brix}$). Koetz et al. (2010) também encontraram ajuste linear negativo para o teor de sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$) dos frutos em função de lâminas de irrigação equivalentes a 50, 75, 100 e 125% necessárias

para a reposição de água no solo até a condição de capacidade de campo. Na ocasião, a regressão linear simples mostrou-se significativa ($p<0,009$) com coeficiente de determinação de 60,72%.

Uma consideração importante para o resultado obtido nesta figura é que, a partir do ponto referente ao tratamento de 40%, ocorreu diminuição na média do teor de sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$) com o aumento das lâminas, até 100%. Segundo Borguini et al. (2005) os sólidos solúveis representam a percentagem (em peso) de sólidos que se encontram dissolvidos no alimento. Ainda de acordo com os autores, para o caso de frutas, os sólidos solúveis têm tendência a mostrar uma maior concentração com a evolução da maturação, devido aos processos de biossíntese ou ainda pela degradação de polissacarídeos. Na execução dos dois experimentos (períodos seco e chuvoso), notou-se que mediante a deficiência hídrica, os tratamentos apresentaram períodos de colheita diferentes, partindo de 20 a 100% com os menores apresentando colheitas precoces quando comparados aos maiores tratamentos. Apesar da escolha dos frutos ser através do critério de coloração vermelha ou próximo da cor, os frutos colhidos destes tratamentos podem ter apresentado maturação mais avançada comparada aos demais, corroborando o que foi apresentado na figura, onde os maiores teores de sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$) foram verificados nos menores tratamentos, com exceção do valor encontrado no tratamento de 20%.

Na Tabela 15 encontra-se o resumo da análise de variância nas cinco características estudadas dos frutos em função das lâminas de irrigação nos níveis de 5 e 1% de probabilidade para o 2º experimento do tomateiro. Também aplicou-se o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para a comparação de médias das variáveis significativas (Tabela 16).

Tabela 15. Resumo das análises de variância para as variáveis de produção: a) peso do fruto (g), b) diâmetro transversal do fruto (mm), c) diâmetro longitudinal do fruto (mm), d) número de frutos por planta e e) teor de sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$) dos frutos, para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 2º experimento do tomateiro

Fonte de variação	GL	Quadrados médios						
		Peso (g)	Diâmetro transversal (mm)	Diâmetro longitudinal (mm)	Nº de frutos	$^{\circ}\text{Brix}$		
Tratamentos	4	3162,24	**	100,69	**	434,19	**	161,20 ns 0,37 ns
Resíduos	15	401,23		15,27		51,33		106,38 0,27
Total	19							
CV (%)		22,06		7,67		11,40		18,87 9,51

* (significativo a 5% de probabilidade pelo teste F)

** (significativo a 1% de probabilidade pelo teste F)

ns (não-significativo)

De acordo com a Tabela 15 verifica-se que apenas o peso (g), diâmetro transversal (mm) e o Diâmetro longitudinal (mm) apresentaram significância estatística pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade. Já o número de frutos juntamente com o teor de sólidos solúveis (°Brix) não apresentaram significâncias. Com relação ao número de frutos, ressalta-se aqui o que foi explicado anteriormente para este 2º experimento, ou seja, os tratamentos podem ter sofrido influência da variável meteorológica (precipitação), que não garantiu a lâmina real de água aplicada ao longo do experimento, interferindo assim, nos resultados finais. No que se refere ao teor de sólidos solúveis (°Brix) dos frutos analisados, apesar de apresentarem médias diferenciadas em função das reposições hídricas nas plantas, estes valores foram bem próximos, e como o critério de seleção da amostra foi através da coloração destes frutos, possivelmente estes teores não foram suficientemente diferentes ao ponto de apresentarem diferenças significativas.

Tabela 16. Comparação das médias das variáveis de produção que apresentaram significância estatística no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para os tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 2º experimento do tomateiro

VALORES MÉDIOS			
Tratamentos	Peso do fruto (g)	Diâmetro transversal	Diâmetro longitudinal
T1 - 100%	122,55 a	56,71 a	74,63 a
T2 - 80%	114,60 a	55,47 a	70,32 a
T3 - 60%	82,75 ab	48,91 ab	61,61 ab
T4 - 40%	81,10 ab	49,18 ab	60,05 ab
T5 - 20%	53,00 b	44,64 b	47,67 b

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade

Os maiores valores apresentados corresponderam ao tratamento de 100%, comprovando que esta lâmina ou próxima dela, realmente é a que proporciona um rendimento máximo, quando se referem algumas características físico-químicas do tomate (Tabela 16).

A Figura 22 exibe os valores médios das variáveis de produção: número de frutos comerciais (NFC), número de frutos não-comerciais (NFNC), produtividade (kg) total (PT), produtividade (kg) comercial (PC) e produtividade (kg) não-comercial (PNC) em função das reposições de 100, 80, 60, 40 e 20% da necessidade hídrica do tomateiro em estudos realizados no 2º experimento.

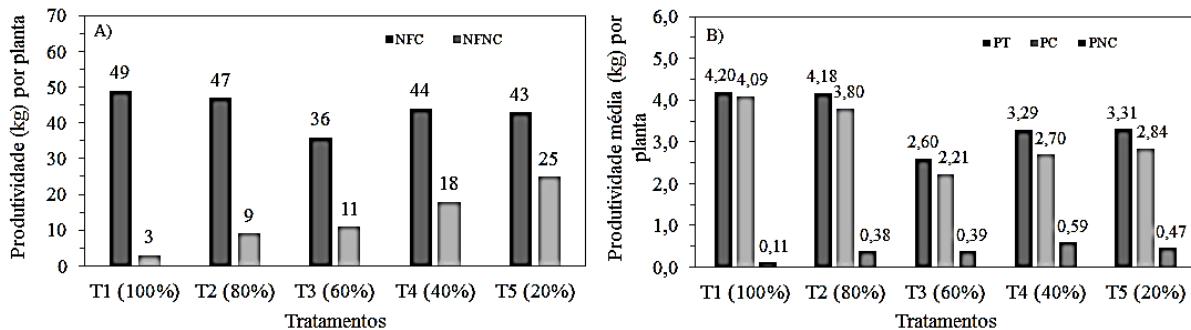


Figura 22. Valores médios das variáveis de produção: a) número de frutos comerciais (NFC) e número de frutos não-comerciais (NFNC); b) produtividade (kg) total (PT), produtividade (kg) comercial PC (kg) e produtividade (kg) não-comercial (PNC) em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 2º experimento do tomateiro

De forma resumida, pode-se analisar pela Figura 22a que as maiores médias do número de frutos comerciais foram para os tratamentos de 100 e 80% com 49 e 47 frutos, respectivamente. O número de frutos, considerados não-comerciais, foi maior para as menores reposições de 20 e 40% com médias de 25 e 18, nesta ordem de tratamentos. Ressalta-se novamente que os tratamentos foram afetados pela instabilidade hídrica ocorrida no período chuvoso, não sendo tão notório estas diferenças, no entanto, as lâminas recomendadas são de 100 e 80%, que produziram quantidades praticamente semelhantes.

Quando se verifica as produtividades (kg) totais, comerciais e não-comerciais, expostas na Figura 22b, observa-se as semelhanças dos tratamentos de 100 e 80%, apresentando produtividades médias totais de 4,20 e 4,18 kg por planta, sendo elas ligeiramente superiores aos demais. Comportamento semelhante aconteceu com a produtividade comercial, com médias de 4,09 e 3,80 kg por planta, para os tratamentos de 100 e 80%, necessário nesta ordem, além de serem superiores aos demais. As maiores produtividades total e comercial observadas no atual experimento são menores, porém, próximas das encontradas por Campagnol et al. (2014) que, na ocasião, foram 4,75 e 4,31 kg por planta, respectivamente. Ainda de acordo com a referida figura, a produtividade média não-comercial (considerando os frutos com podridão apical) apresentou maiores incidências desta anormalidade para os tratamentos de 40 e 20% com médias de 0,59 e 0,47 kg por planta, respectivamente, concluindo-se que o estresse hídrico severo acentuou a incidência de frutos com podridão apical, estando diretamente ligado a diminuição da produtividade comercial do tomateiro.

Diante do tema abordado nesta pesquisa, merece destaque uma observação importante no que se refere ao estudo de aplicação de lâmina de água controlada para planta. No presente experimento, avaliou-se apenas lâminas até um patamar de 100%, que em outras palavras, se não ideal, é próxima da lâmina ótima para o desenvolvimento completo de uma cultura. Foi

verificado que menores lâminas de água ocasionaram estresse hídrico à planta, diminuindo sua produtividade e aumentando incidência de problemas a cultura, além da redução de diluição de cálcio, provocando o aumento da podridão apical.

Ressalta-se que o excesso de água também provoca danos à planta. Quando se fala em produção, Alvino et al. (1986) mostraram que irrigações em abundância não aumentam o rendimento, mas diminuem a qualidade do produto. Portanto, é importante evidenciar novamente a necessidade do manejo adequado onde se busque de forma objetiva um equilíbrio ótimo entre produção obtida e quantidade de água aplicada às plantas de maneira a evitar possíveis desperdícios do recurso hídrico durante todo o processo de desenvolvimento do tomateiro.

Embora perceba-se diferenças visuais tanto no número de frutos quanto nas produtividades médias (kg) para as diferentes lâminas aplicadas em campo, observou-se serem estatisticamente iguais, quando analisados pela análise de variância, cujos detalhes são exibidos na Tabela 17.

Tabela 17. Resumo das análises de variância para as variáveis de produção: número de frutos comerciais (NFC), número de frutos não-comerciais (NFNC), produtividade (kg) total (PT), produtividade (kg) comercial PC e produtividade (kg) não-comercial (PNC), em função dos tratamentos de 100, 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura realizados durante a execução do 2º experimento do tomateiro

Fonte de variação	GL	Quadrados médios					
		NFC	NFNC	PT	PC	PNC	
Tratamentos	4	103,38	ns	142,33	ns	1,83	ns
Resíduos	15	128,68		56,43		1,13	1,35
Total	19	---		---			0,13
CV (%)	---	25,93		68,92		30,22	53,47

* (significativo a 5% de probabilidade pelo teste F)

** (significativo a 1% de probabilidade pelo teste F)

ns (não-significativo)

Merece destaque que diferenças não significativas foram encontradas por outros autores. Cararo e Duarte (2002) estudaram os efeitos da aplicação de lâminas de água (40, 60, 80, 100, 120 e 140% da lâmina requerida pela cultura) e da injeção de dióxido de carbono (CO_2) no sistema de irrigação sobre o tomateiro, sob duas estufas. Destaca-se que as lâminas de irrigação utilizadas sem aplicação de CO_2 não proporcionaram efeitos significativos em algumas variáveis como, por exemplo, produtividade e percentagem de matéria seca dos frutos.

Já em condição de campo, Campagnol et al. (2014) estudaram o efeito de diferentes lâminas de irrigação (60, 80, 100, 120 e 140% da evapotranspiração da cultura) e da cobertura

do solo com filme de polietileno preto. Os autores verificaram que o volume de água aplicado via irrigação não influenciou na produtividade total, produtividade comercial, massa média dos frutos e número de frutos por planta.

5.4. Determinação da evapotranspiração e do coeficiente de cultivo do tomateiro

Através dos dados obtidos pelo balanço hídrico do solo no 1º experimento (2016) e repetição (2017), a Figura 23 exibe a evapotranspiração do tomateiro da variedade “Shanty” assim como seu coeficiente de cultivo (Kc), cultivado na região de estudo.

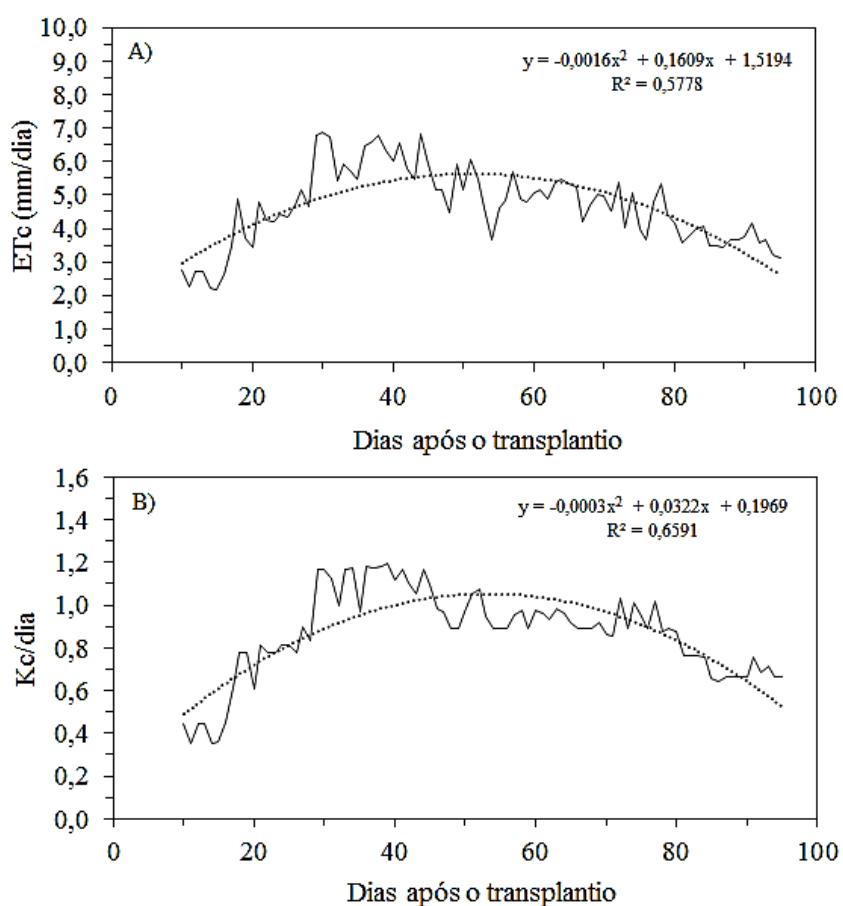


Figura 23. Comportamentos diários: a) evapotranspiração (mm) e b) coeficiente de cultura (Kc) do tomateiro para a região de estudo determinados por meio do balanço hídrico do solo através da execução (2016) e repetição (2017) dos experimentos

Através da Figura 23a, pode-se observar a ocorrência de um período (por volta do DAT 29 até o DAT 47) em que houve um predomínio dos valores da evapotranspiração do tomateiro serem superiores aos demais, correspondendo ao estágio intermediário desta cultura. A equação de ajuste resultou num modelo polinomial do 2º grau, apresentando coeficiente de determinação de aproximadamente 58%. Na Figura 23b, observa-se que o Kc seguiu o mesmo

comportamento, com ajuste polinomial do 2º grau e coeficiente de determinação de aproximadamente 66%, com predominância de maiores valores para o estágio intermediário da cultura.

Na Tabela 18 encontram-se os valores do coeficiente de cultura nos diferentes estágios do tomateiro, obtidos por meio dos dois experimentos de campo para região de estudo.

Tabela 18. Determinação do coeficiente de cultura do tomateiro em condição de campo durante a execução (2016) e repetição (2017) dos experimentos

Estágios da cultura	Doorenbos & Kassam (1994)	Kc experimental
Inicial	0,40 - 0,50	0,40
Desenvolvimento	0,70 - 0,80	0,75
Intermediário	1,05 - 1,25	1,11
Final	0,80 - 0,90	0,93
Colheita	0,60 - ,065	0,70

Pode-se verificar pela Tabela 18, que os valores do Kc do tomateiro nesta região apresentaram coerência com aqueles encontrados por Doorenbos e Kassam (1994), ressaltando que, no estágio final apresentou um valor do Kc de 0,93 e colheita de 0,70 que, apesar de serem diferentes, de maneira geral foram próximos aos encontrados pelos autores.

Os resultados determinados nesta pesquisa foram coerentes com os valores encontrados por Santana et al. (2011) que, na ocasião, determinaram o Kc do tomateiro para a região de Uberaba-MG. No estudo dos autores, os valores encontrados para o coeficiente de cultivo do tomateiro foram: 0,37 para o estágio inicial, 0,72 para o desenvolvimento, 1,03 para o intermediário, 1,10 para o final e 0,75 para a colheita.

5.5. Modelagem com o AquaCrop

No estudo de desempenho de um modelo é essencial a calibração do mesmo às condições locais de uma região. O estudo de desempenho do modelo da FAO foi possível através da calibração do modelo para condições “ideais”, utilizando a reposição de 100% da necessidade hídrica da cultura, onde busca-se encontrar uma menor distância entre valores observados em campo e estimados pelo modelo, através de ajustes dos parâmetros às condições observadas. O processo de validação consiste em testar e verificar se o modelo, após ser calibrado, consegue simular adequadamente o que acontece com aquela cultura naquela região de estudo. Neste caso, a pesquisa consistiu em exibir uma nova proposta de validação, onde o processo de calibração foi através do ajuste de dados observados nas condições ideais para a

cultura (reposição de 100%) e a validação através da comparação com os demais tratamentos aplicados, que foram: 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura.

5.5.1. Calibração

A Figura 24 exibe a comparação entre os resultados obtidos no experimento em campo com os simulados pelo AquaCrop para a biomassa total (B) e a produtividade (Y). No processo de calibração, buscou-se ajustar os parâmetros teóricos presentes no modelo com os determinados em condições reais de campo de estudo para o tratamento de 100% (sem estresse hídrico), através de um ajuste que proporcionasse maior aproximação entre os resultados medidos e os simulados.

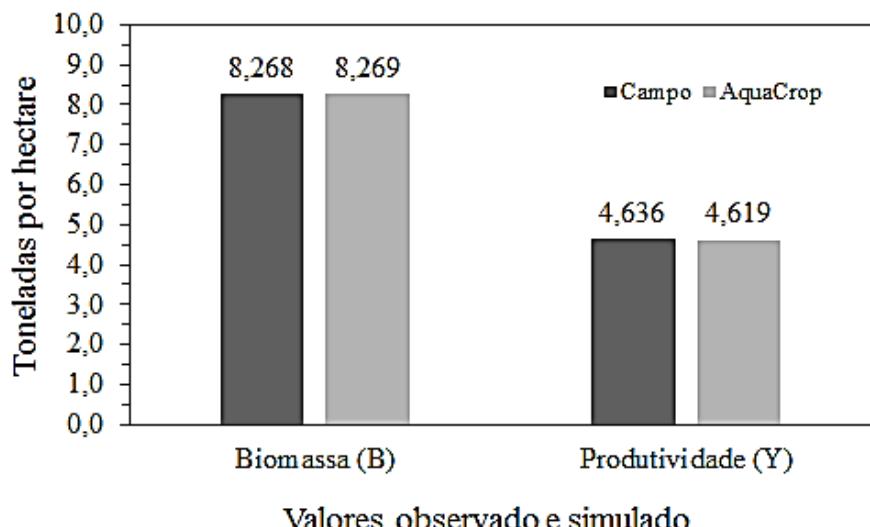


Figura 24. Comparação entre os valores observados e simulados pelo AquaCrop no processo final de calibração para a cultura do tomateiro durante a execução do 2º experimento

Através deste ajuste, com uma ótima aproximação entre observado e calibrado, foi possível determinar os parâmetros locais de calibração do modelo, conforme Tabela 19.

Tabela 19. Comparação entre os valores contidos no AquaCrop e os valores calibrados para a cultura do tomateiro no ano de 2017

Símbolos	Descrição dos parâmetros	Valores		
		Padrão	Calibrado	Unidades
Desenvolvimento da cobertura do dossel verde				
n	Número de plantas por hectare	33.333	15.789	planta/ha
	Tempo da semeadura até emergência / transplantio até recuperação	4	6	dias
CCx	Máxima cobertura do dossel	75	74	%
	Tempo da semeadura/transplantio até início da senescência	91	65	dias
	Tempo da semeadura/transplantio até a maturidade, ou seja, duração do ciclo da cultura	110	89	dias
Floração				
	Tempo da semeadura/transplantio até floração	34	29	dias
	Duração do estágio da floração	42	58	dias
Desenvolvimento na zona da raiz				
Zn	Profundidade mínima efetiva de enraizamento	0,3	0,3	m
Zx	Profundidade máxima efetiva de enraizamento	1,0	0,78	m
	Tempo da semeadura/transplantio até profundidade máxima de enraizamento	55	32	dias
Índice de colheita				
HIo	Índice de colheita de referência	63	57	%

Pode-se perceber que os valores calibrados para condições de campo apresentaram significativa semelhança com os valores do default do modelo, com exceção do número de plantas por hectare que foi muito diferente daquele sugerido pelo modelo. Com relação ao tempo da recuperação do tomateiro após o transplantio, foi considerado um maior período de tempo neste experimento, proporcionando uma duração de 6 dias.

Ressaltam-se diferenças na duração dos estágios da planta medido em campo com aqueles do default do modelo (medido, default). Do transplantio até a: (i) floração (29, 34), (ii) máxima profundidade da raiz (32, 55), (iii) senescência (65, 91) e (iv) maturidade (89, 110). A explicação plausível para essa diferença entre períodos está no fato de que a variedade analisada apresenta característica de ser rápida em seu desenvolvimento, que contribuiu para uma aceleração de suas fases. Por fim, merece destaque também a profundidade efetiva máxima da raiz (0,78 m), bem próxima da sugerida pelo default do modelo, além do índice de colheita de referência (57%), que foi abaixo do valor encontrado no AquaCrop.

Comparando aos demais autores que também utilizaram o AquaCrop, destaca-se Katerji et al. (2013) que estudando as culturas do milho e tomate na região Mediterrânea, calibraram o modelo para o tomateiro, mostrando os parâmetros de calibração. Dos diversos valores dos parâmetros encontrados na presente pesquisa, destacam-se a proximidade entre os valores da

máxima cobertura do dossel, máxima profundidade efetiva da raiz e o índice de colheita de referência (H_{Io}). Dentre essas variáveis, a maior proximidade deu-se na máxima profundidade efetiva da raiz (m) e índice de colheita de referência (%).

Linker et al. (2016) também estudaram o tomate através do AquaCrop em Po Valley (Itália). Dos vários parâmetros da calibração local encontrados pelos autores, merece destaque que a máxima cobertura do dossel (68%) foi bem abaixo ao ajustado nesta pesquisa (74%); a máxima profundidade efetiva da raiz (0,75 m) muito próximo do encontrado em campo (0,78 m); já o tempo do transplantio até profundidade máxima da raiz (dias) calibrado pelos autores foi 52, bem distante dos 32 encontrados nesta pesquisa. Destaca-se ainda a comparação do tempo (em dias) encontrado pelos autores ao desta pesquisa, iniciando do transplantio até o começo da floração, senescência e maturidade, que demonstra a precocidade da variedade da cultura analisada aliada às condições climáticas locais de realização do experimento.

A Figura 25 apresenta os resultados gerados pelo AquaCrop após calibração às condições locais de campo para algumas características do tomateiro.

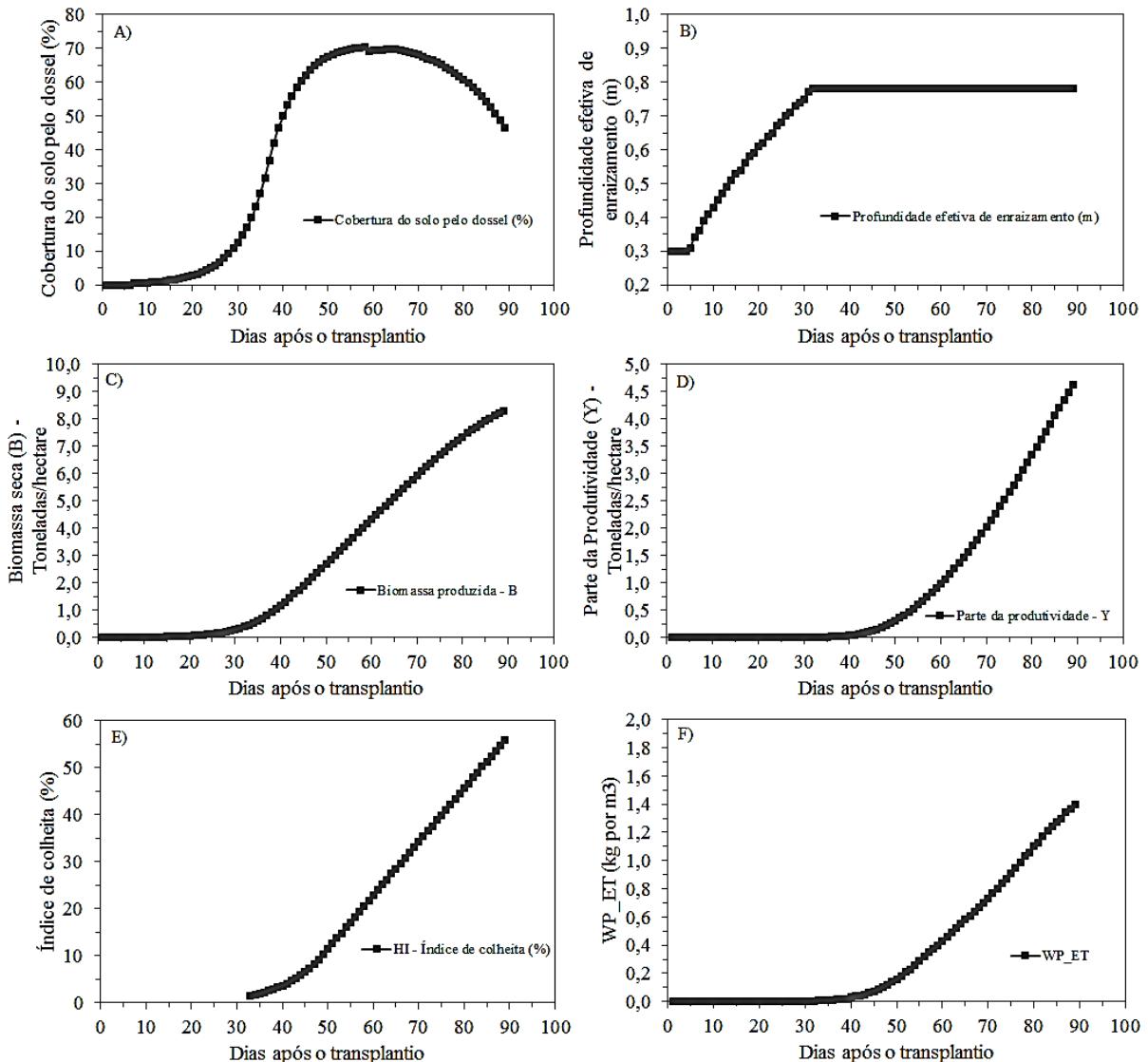


Figura 25. Resultados gerados pelo modelo AquaCrop após a calibração local para: a) cobertura do solo pelo dossel (%); b) profundidade da raiz (m); c) biomassa total produzida (ton/ha); d) produtividade simulada (ton/ha); e) processo de formação do índice de colheita (%) e f) produtividade em função da demanda de água evapotranspirada pela cultura (kg/m^3)

Na Figura 25 verificam-se várias informações importantes acerca da acurácia da calibração local do modelo: a cobertura máxima do dossel (%) foi atingida em torno do DAT 58 (Figura 26a), evidenciando natural decréscimo após esta data; a profundidade efetiva máxima da raiz (m) foi atingida em torno do 32 DAT (Figura 25b); a biomassa total produzida foi superior a 8 ton/ha, iniciando sua formação a partir do DAT 7 (Figura 25c); a produtividade desta variedade sob as condições impostas na calibração local foi superior a 4,5 ton/ha, iniciando sua formação a partir do DAT 33 (Figura 25d); o índice de colheita (%) tem comportamento semelhante a sua produtividade, com início a partir do DAT 33 (Figura 25e); por fim, a produtividade em função da demanda de água evapotranspirada pela cultura apresentou valor de 1,4 kg/m^3 , também iniciando a partir do 33 DAT (Figura 25f),

comprovando mais uma vez a precocidade desta variedade, colaborada também pela condição climática da região semiárida.

5.5.2. Validação do AquaCrop

A metodologia de validação do AquaCrop nesta pesquisa foi possível através da comparação entre os valores observados em condições de campo com os simulados pelo modelo para o tomateiro, realizando à devida comparação dos resultados finais encontrados para os tratamentos de 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura, com os valores simulados para as mesmas reposições. Foram comparadas a biomassa total (ton/ha) e produtividade da cultura (ton/ha), cujos resultados encontram-se na Figura 26.

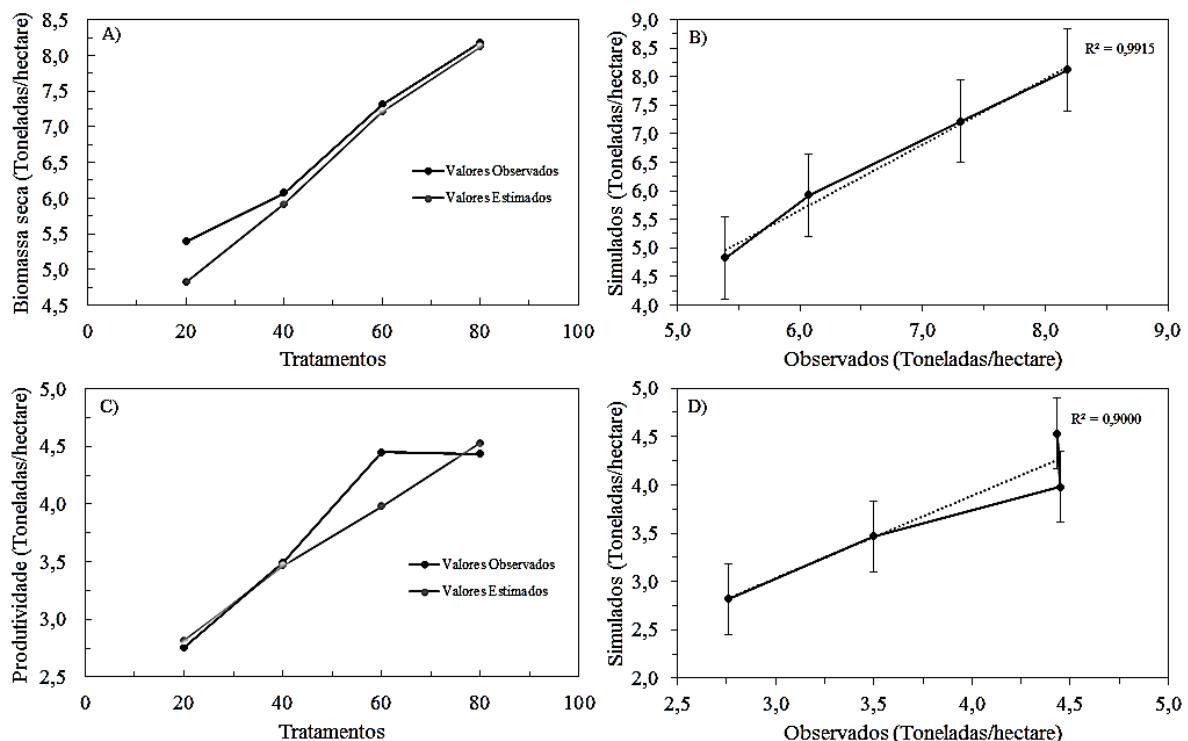


Figura 26. Estudo dos valores observados em condições de campo com os simulados pelo modelo AquaCrop no processo de validação para os tratamentos de 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura: a) comportamento das biomassas totais (ton/ha) observada e simulada para os tratamentos; b) relação dos valores observados e estimados para a biomassa total (ton/ha); c) comportamento das produtividades (ton/ha) observada e simulada para os tratamentos; d) relação dos valores observados e estimados para a produtividade (ton/ha)

Nota: As barras indicam o erro padrão da média para os valores simulados

Analizando a Figura 26a verifica-se que o ajuste possibilitou um comportamento muito bom a partir do tratamento de 40% para a biomassa total (ton/ha), ou seja, embora o modelo tenha apresentado todas as estimativas abaixo dos valores observados, o AquaCrop conseguiu

estimar de forma satisfatória a situação real de campo em função das deficiências hídricas impostas nestes tratamentos, principalmente quando comparado seu desempenho nesta estimativa de biomassa total (Figura 26b).

Para o estudo da estimativa da produtividade (Figura 26c), o modelo não apresentou boa estimativa para o tratamento de 60%, porém, é necessário o esclarecimento que, em condições de campo, o mesmo apresentou problemas que podem ter afetado esta produtividade. Ressalta-se ainda que o período estudado com o AquaCrop foi o 2º experimento, cujas condições já foram esclarecidas ao longo do desenvolvimento desta pesquisa. Já os demais tratamentos foram estimados com boa aproximação, no entanto, a comparação visual das produtividades é considerada satisfatória, como exibido na Figura 26d. A Tabela 20 a seguir comprova o que foi verificado na figura anterior para a biomassa total e produtividade.

Tabela 20. Comparação entre os valores observados e simulados pelo AquaCrop para os tratamentos de 80, 60, 40 e 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura

Tratamentos	Biomassa total (ton/ha)			Produtividade (ton/ha)		
	Observado	Simulado	Diferença (%)	Observado	Simulado	Diferença (%)
T2-80%	8,183	8,122	0,745	4,433	4,532	-2,233
T3-60%	7,315	7,215	1,367	4,449	3,980	10,542
T4-40%	6,072	5,920	2,503	3,496	3,467	0,830
T5-20%	5,390	4,822	10,538	2,757	2,817	-2,176

Através desta tabela pode-se perceber a grande capacidade do modelo em simular condições de campo, com a biomassa total apresentando maior diferença em T5 (10,538%). Já a produtividade apresentou uma maior diferença no T3 (10,542%), que de forma geral, foi considerado um bom ajuste e validação para o tomateiro cultivado sob irrigação em condições climáticas semiáridas. Para comprovar a acurácia do modelo AquaCrop, a Tabela 21 exibe as estatísticas necessárias para avaliar o seu desempenho.

Tabela 21. Estatísticas utilizadas na validação do modelo AquaCrop para biomassa total (ton/ha) e produtividade (ton/ha) do tomateiro

Indicadores estatísticos	Biomassa total - B	Produtividade - Y
R^2	0,991	0,900
RMSE	0,300	0,242
NRMSE (%)	4,446	6,401
EF	0,923	0,883
d	0,984	0,967

Analisando a biomassa total, pode-se perceber que o coeficiente de determinação foi de 99%, considerado um ótimo ajuste. No caso da produtividade, este coeficiente foi de 90%,

considerado um bom ajuste. Isso comprova o grande poder do AquaCrop em estimar o rendimento do tomateiro cultivado nas condições climáticas ocorridas neste experimento.

A raiz do erro quadrado médio (RMSE) foi de 0,300 e 0,242 para biomassa total e produtividade, respectivamente. Já a raiz do erro quadrado médio normalizado (NRMSE-%) foi de 4,446 e 6,401% para biomassa total e produtividade, respectivamente, sendo considerado uma simulação excelente (<10%).

Nesta pesquisa, o coeficiente de eficiência do modelo Nash-Sutcliffe (EF) resultou em 0,923 e 0,883 para a biomassa total e produtividade, respectivamente, que pode ser considerado um bom resultado, principalmente na simulação desta biomassa.

Através do índice de acordo de Willmott (d), percebe-se que os valores encontrados na validação foram próximos de 1, com 0,984 para a biomassa total e 0,967 para a produtividade, considerado uma ótima concordância de ajuste dos dados simulados e observados nesta pesquisa.

Katerji et al. (2013) validaram o modelo para as culturas do milho e tomate na região Mediterrânea, cuja comparação entre valores observados e simulados pelo modelo resultou num coeficiente de determinação de 99% para a produtividade (ton/ha) do tomateiro. Porém, é de suma importância ressaltar que a definição dos tratamentos apresentada pelos autores foi diferente da metodologia proposta para esta pesquisa. O intuito na presente pesquisa foi calibração do AquaCrop para o tratamento “controle”, ou seja, 100% e validação para os demais tratamentos, que foram 80, 60, 40 e 20% da necessidade hídrica da cultura, mostrando que, apesar de diferentes metodologias, foi satisfatória a comparação do desempenho deste modelo. Por outro lado, é importantíssimo ressaltar a necessidade de realização das repetições de experimentos desta cultura nas condições aqui abordadas, no sentido de confirmar ou não as características encontradas neste trabalho. Contudo, apesar de não ter ocorrido a repetição de experimentos, o modelo foi capaz de mostrar, através dos indicadores estatísticos, que após à devida calibração local, o AquaCrop se mostra como um modelo robusto nas previsões da biomassa total e da produtividade para tratamentos com deficiência hídrica.

Os resultados encontrados nesta pesquisa direcionam a comprovação de que o modelo AquaCrop pode ser visto como uma ótima ferramenta de auxílio nas estratégias de campo, tão essenciais na agricultura de precisão, além da colaboração na busca do equilíbrio entre produtividade e demanda hídrica.

6. CONCLUSÕES

- a) As variáveis peso, diâmetro transversal e diâmetro longitudinal do tomateiro apresentaram diferenças estatisticamente significativas ao nível de 1% de probabilidade para as reposições de água de 100, 80, 60, 40 e 20% da necessidade hídrica da cultura nos dois experimentos realizados nos anos de 2016 e 2017;
- b) A lâmina recomendada para obtenção de maior produtividade foi de 100%, ressaltando que, a lâmina de 80% mostrou resultados próximos desta recomendada, demonstrando que a irrigação do tomateiro “Shanty” pode ser programada tanto com uso de 100% como de 80% da necessidade hídrica da cultura para o Agreste da Paraíba;
- c) Os valores do K_c obtidos para o tomateiro foram 0,40; 0,75; 1,11; 0,93 e 0,70 para os estágios inicial, desenvolvimento, intermediário, final e colheita, respectivamente.
- d) A calibração local do AquaCrop para o tomateiro possibilitou à determinação de parâmetros que poderão ser utilizados pelo modelo em futuras simulações de biomassa total e produtividade no Agreste da Paraíba;
- e) A proposta de validação do modelo AquaCrop mostrou resultados, sob o ponto de vista estatístico, excelente para biomassa total e bom para a produtividade com coeficientes de determinação de 99 e 90%, respectivamente, que confirma a capacidade do modelo de realizar boas estimativas em situações de déficit hídrico no tomateiro.

7. REFERÊNCIAS

- Adams, J. E., Arkin, G. F.; Ritchie, J. T. Influence of row spacing and straw mulch on first stage drying. *Soil Science Society of America Journal*, v. 40, n. 3, p. 436-442, 1976.
- Akumaga, U.; Tarhule, A.; Yusuf, A. A. Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 232, p. 225-234, 2017.
- Alencar, L. P. de. Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar. 2014. 117 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- Alvarenga, M. A. R. Tomate: produção em campo, casa de vegetação e hidroponia. 2. ed. Lavras: Editora Universitária de Lavras, 2013. 455 p.
- Alvino, A.; D'andria, R.; Zerbi, G. Yield and quality of processing tomato varieties, as raw and canned product, with relation to irrigation level. *Acta Horticulturae*, n. 194, p. 117-124, 1986.
- 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*). *Agricultural Water Management*, v. 97, p. 1838-1846. 2010.
- Azevedo, B. M. de; Bastos, F. G. C.; Viana, T. V. de A.; Rêgo, J. de L.; D'Ávila, J. H. T. Efeitos de níveis de irrigação na cultura da melancia. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 36, n. 1, p. 9-15, 2005.
- Barboza Júnior, C. R. A.; Folegatti, M. V.; Rocha, F. J.; Atarassi, R. T. Coeficiente de cultura da lima-ácida Tahiti no outono-inverno determinado por lisimetria de pesagem em Piracicaba-SP. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v. 28, n. 4, p. 691-698, 2008.
- Battilani, A.; Prieto, M. H.; Argerich, C.; Campillo, C.; Cantore, V. Herbaceous Crops-Tomato. In: Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Fereres, E.; Raes, D. In: *Crop yield response to water*. FAO irrigation and Drainage Paper 66, Roma, Itália, 2012. Cap. 3 (3.4), p. 192-199.
- 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.
- Bezerra, M. V. C.; Silva, B. B. da; Bezerra, B. G.; Borges, V. P.; Oliveira, A. S. de. Evapotranspiração e coeficiente de cultura do algodoeiro irrigado a partir de imagens de sensores orbitais. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 43, n. 1, p. 64-71, 2012.

Blum, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential - are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Australian Journal of Agricultural Research*, Austrália, v. 56, p. 1159-1168, 2005.

Borguini, R. G.; Silva, M. V. da. Características Físico-Químicas e Sensoriais do Tomate (*Lycopersicon esculentum*) Produzido Por Cultivo Orgânico em Comparaçao ao Convencional. *Alimentos e Nutrição*, Araraquara, v. 16, n. 4, p. 355-361, 2005.

Buske, T. C. Comportamento da umidade do solo determinada por métodos expeditos. 2013, 67 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2013.

Bussab, W. de O.; Morettin, P. A. Estatística Básica. 5. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2007. 526 p.

Cabral Júnior, J. B.; Almeida, H. A. de; Silva, C. M. S. e. Análise Comparativa da Temperatura do Ar em Campina Grande, PB, Obtida Pelo Método Dos Extremos e Pelo Padrão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 6, n. 4, p. 888-902, 2013.

Campagnol, R.; Abrahão, C.; Mello, S. da C.; Oviedo, V. R. S. C.; Minami, K. Impactos do Nível de Irrigação e da Cobertura do Solo na Cultura do Tomateiro. *Irriga*, Botucatu, v. 19, n. 3, p. 345-357, 2014.

Campeche, L. F. De S. M.; Franca, R. J. Da F.; Leitão, M. De M. V. B. R.; Silva, J. S. Da; Paz, V. P. Da S. Microclima e evapotranspiração de tomate em dois sistemas de produção no Vale do São Francisco. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v. 25, n. 1, p. 133-142, 2017.

Cararo, D. C.; Duarte, S. N. Injeção de CO₂ e lâminas de irrigação em tomateiro sob estufa. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v. 20, n. 3, p. 432-437, 2002.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Campina Grande, estado da Paraíba. (Orgs.) Mascarenhas, J de C.; Beltrão, B. A.; Souza Junior, L. C. de; Morais, F de; Mendes, V. A.; Miranda, J. L. F. de. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/15949/Rel_Campina_Grande.pdf?sequence=1>. Acesso em: 04 set. 2017.

Doorenbos, J., Kassam, A. H. Yield response to water. *Irrigation And Drainage Paper* no. 33. FAO, Rome, 1979.

Doorenbos, J.; Kassam, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Tradução de H. R. Gheyi; A. A. de Sousa; F. A. V. Damasceno; J. F. de Medeiros. Campina Grande: UFPB, 306 p, 1994. (FAO, Estudos de irrigação e Drenagem, 33).

Duarte, G. R. B.; Schöffel, E. R.; Mendez, M. E. G.; Paula, V. A. de. Medida e estimativa da evapotranspiração do tomateiro cultivado sob adubação orgânica em ambiente protegido. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 31, n. 3, p. 563-574, 2010.

Dusi, A. N. et al. A Cultura do tomateiro (para mesa). Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Hortalícias – CNPH, 92 p, 1993.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em :<<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/tomato/en/>>. Acesso em: 18 fev. 2018.

Fernandes, A. A.; Martinez, H. E. P.; Silva, D. J. H. da; Barbosa, J. G. Produção de mudas de tomateiro por meio de estacas enraizadas em hidroponia. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 39, n. 4, p. 343-348, 2004.

Ferreira, M. D.; Cortez, L. A. B.; Honório, S. L.; Tavares, M. Avaliação física do tomate de mesa ‘romana’ durante manuseio na pós-colheita. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 321-327, 2006.

Ferreira, S. M. R.; Quadros, D. A. de; Karkle, E. N. L.; Lima, J. J. De; Tullio, L. T.; Freitas, R. J. S. de. Qualidade pós-colheita do tomate de mesa convencional e orgânico. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v. 30, n. 4: p. 858-864, 2010.

Filgueira, F. A. R. Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa: UFV, 402 p, 2000.

Fontes, P. C. R. Podridão apical do tomate, queima dos bordos das folhas em alface e depressão amarga dos frutos em maçã: deficiência de Ca? Horticultura Brasileira, Brasília, v. 21, n. 2, p. 144, 2003.

Franke, A. E., Konig, O. Determinação do coeficiente de cultura (Kc) da batata (*Solanum Tuberosum L.*), nas condições edafoclimáticas de Santa Maria, RS. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 29, n. 4, p. 625-630, 1994.

Freitas, J. C. de. Análise de agrupamentos na identificação de regiões homogêneas de índices climáticos no Estado da Paraíba. 2009, 75 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2009.

Gomes Júnior, J.; Silva, A. J. N. da; Silva, L. L. M.; Souza, F. T. de; Silva, J. R. da. Crescimento e produtividade de tomateiros do grupo cereja em função da aplicação de biofertilizante líquido e fungo micorrízico arbuscular. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, Recife, v. 6, n. 4, p. 627-633, 2011.

Guedes, R. A. A.; Oliveira, F. de A. de; Alves, R. de C.; Medeiros, A. S. de; Gomes, L. P.; Costa, L. P. Estratégias de irrigação com água salina no tomateiro cereja em ambiente protegido. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 19, n. 10, p. 913-919, 2015.

Guilherme, D. de O.; Pinho, L. de; Cavalcanti, T. F. M.; Costa, C. A. da; Almeida, A. C. de. Análise sensorial e físico-química de frutos tomate cereja orgânicos. Revista Caatinga, Mossoró, v. 27, n. 1, p. 181-186, 2014.

Haileselassie, H.; Araya, A.; Habtu, S.; Meles, K. G.; Gebru, G.; Kisekka, I.; Girma, A.; Hadgu, K. M.; Foster, A. J. Exploring optimal farm resources management strategy for Quncho-teff (Eragrostis tef (Zucc.) Trotter) using AquaCrop model. *Agricultural Water Management*, v. 178, p. 148-158, 2016.

Hanson, B. R.; May, D. M. Crop coefficients for drip-irrigated processing tomato. *Agricultural Water Management*, v. 81, n. 3, p. 381-399, 2006.

Hsiao, T. C. The soil-plant-atmosphere continuum in relation to drought and crop production. p. 39-52. In *Drought resistance in crops, with emphasis on rice*. IRRI, Los Banos, the Philippines. 1982.

Hsiao, T. C.; Heng, L.K.; 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, n. 3, p. 448-459, 2009.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento sistemático da produção agrícola: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. Rio de Janeiro, v. 29, n. 12, p. 1-82, dez. 2016.

Kaiser, D. R.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M.; Minella, J. P. G. Dielectric Constant Obtained From TDR And Volumetric Moisture of Soils in Southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 34, n. 3, p. 649-658, 2010.

Kalungu, J. W. Resposta do tomateiro a diferentes lâminas de irrigação, doses de potássio, cobertura do solo em ambiente protegido. 2008, 80 f. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

Katerji, N.; Campi, P.; Mastrorilli, M. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, v. 130, p. 14-26, 2013.

Koetz, M; Masca, M. G. C. C.; Carneiro, L. C.; Ragagnin, V. A.; Sena Junior, D. G. de; Gomes Filho, R. R. Caracterização Agronômica e °Brix em Frutos de Tomate Industrial Sob Irrigação Por Gotejamento no Sudoeste de Goiás. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, Fortaleza, v. 4, n. 1, p. 14-22, 2010.

Larcher, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: Rima, p. 533, 2006.

Lima, T. P. de; Gomes Filho, R. R.; Cadore, R.; Freitas, D. S.; Carvalho, C. M. de; Netto, A. O. de A. Lâminas de irrigação e formas de adubação na produção de tomate de mesa. *Revista Agropecuária Técnica*, Areia, v. 38, n. 1, p. 18-25, 2017.

Linker, R; Ioslovich, I; Sylaios, G; Plauborg, F.; Battilani, A. Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: A simulation study with cotton, potato and tomato. *Agricultural Water Management*, v. 163, p. 236-243, 2016.

Loomis, R. S.; Rabbinge, R; Ng, E. Explanatory models in crop physiology. *Annual Review of Plant Physiology*, v. 30, p. 339-367, 1979.

- Lopes, O. D.; Kobayashi, M. K.; Oliveira, F. G.; Alvarenga, I. C. A.; Martins, E. R.; Corsato, C. E. Determinação do coeficiente de cultura (Kc) e eficiência do uso de água do alecrim-pimenta irrigado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 15, n. 6, p. 548–553, 2011.
- Malheiros, S. M. M.; Silva, E. F. de F. E; Medeiros, P. R. F. de; Pedrosa, E. M. R.; Rolim, M. M.; Santos, A. N. Cultivo hidropônico de tomate cereja utilizando-se efluente tratado de uma indústria de sorvete. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 16, n. 10, p. 1085- 092, 2012.
- Marouelli, W. A.; Silva, H. R. da; Silva, W. L de C. e. Irrigação do tomateiro para processamento. Brasília-DF: Embrapa Hortaliças, 2012. 24 p. Circular Técnica, 102.
- Marouelli, W. A.; Silva, W. L. C.; Silva, H. R. Irrigação por aspersão em hortaliças: qualidade da água, aspectos do sistema e método prático de manejo. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica: Embrapa Hortaliças, 111 p, 2001.
- McMaster, G. S.; Wilhelm, W. W. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 87, n. 4, p. 291-300, 1997.
- Medeiros, A. M. T. de; Silva, M. P. da; Medeiros, R. M. de; Lima, R. da C. C. Mudanças Climáticas em Campina Grande-PB - Um Estudo Sobre o Aquecimento Urbano. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 4, n. 2, p. 278-285, 2011.
- Medeiros, P. R. F.; Duarte, S. N.; Silva, E. F. de F. e. Eficiência do uso de água e de fertilizantes no manejo de fertirrigação no cultivo do tomateiro sob condições de salinidade do solo. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v. 7, n. 2, p. 344-351, 2012.
- Mendonça, J. C.; Sousa, E. F. de; Bernardo, S.; Sugawara, M. T.; Peçanha, A. L.; Gottardo, R. D. Determinação do coeficiente cultural (Kc) do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), em Campos dos Goytacazes, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 11, n. 5, p. 471-475, 2007.
- Mirsafi, Z. S.; Sepaskhah, A. R.; Ahmadi, S. H.; Kamgar-Haghghi, A. A. Assessment of AquaCrop model for simulating growth and yield of saffron (*Crocus sativus* L.). *Scientia Horticulturae*, v. 211, p. 343-351, 2016.
- Monteith, J. L. The quest for balance in crop modelling. *Agronomy Journal*, v. 88, p. 695-697, 1996.
- Montenegro, A. A. T.; Gomes, A. R. M.; Miranda, F. R. de; Crisóstomo, L. A. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da bananeira para a região litorânea do Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 39, n. 2, p. 203-208, 2008.
- Montoya, F.; Camargo, D.; Ortega, J. F.; Córcoles, J. I.; Domínguez, A. Evaluation of AquaCrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, v. 164, part. 2, p. 267-280, 2016.

Morell, F. J.; Yang, H. S.; Cassman, K. G.; Wart, J. V.; Elmore, R. W.; Licht, M.; Coulter, J. A.; Ciampitti, I. A.; Pittelkow, C. M.; Brouder, S. M.; Thomison, P.; Lauer, J.; Graham, C.; Massey, R.; Grassini, P. Can crop simulation models be used to predict local to regional maize yields and total production in the U.S. Corn Belt? *Field Crops Research*, v. 192, p. 1-12, 2016.

Netto, J. A.; Azevedo, P. V. de; Silva, B. B. da; Soares, J. M.; Teixeira, A. H. de C. Exigências hídricas da videira na Região do Submédio São Francisco. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 35, n. 8, p. 1559-1566, 2000.

Oliveira, R. A.; Rocha, I. de B.; Sedyama, G. C.; Puiatti, M.; Cecon, P. R.; Silveira, S. de F. R. Coeficientes de cultura da cenoura nas condições edafoclimáticas do Alto Paranaíba, no Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 280-284, 2003.

Ometto, J. C. *Bioclimatologia Vegetal*. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1981. 440 p.

Paltineanu, I. C.; Starr, J. L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Science Society of America Journal*, v. 61, p. 1576-1585, 1997.

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.

Pereira, L. S.; Paredes, P.; Rodrigues, G. C.; Neves, M. Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. *Agricultural Water Management*, v. 159, p. 239-254, 2015.

Primo, J. T. de A.; Silva, T. G. F. da; Silva, S. M. S. E; Moura, M. S. B. de; Souza, L. S. B. de. Calibração de sondas capacitivas, funções físico-hídricas e variação do armazenamento de água em um argissolo cultivado com palma forrageira. *Revista Ceres*, v. 62, n. 1, p. 020-029, 2015.

Pulupol, L. U.; Behboudian, M. H.; Fisher, K. J. Growth, Yield, and Postharvest Attributes of Glasshouse Tomatoes Produced under Deficit Irrigation. *HortScience*, v. 31, n. 6, p. 926-929, 1996.

<http://publicdomainvectors.org/tn_img/johnny_automatic_tomato_plant.png>. Acesso em: 26 nov. 2016.

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, n. 3, p. 438-447, 2009.

Ramos, F. T.; Pivetta, F.; Matos, V. A. T. de; Seixas, G. de B.; Campelo Júnior, J. H. Acurácia e calibração de uma sonda de capacitância em um neossolo quartzarenico cultivado com caju. *Bioscience Journal*, v. 30, n. 6, p. 1631-1641, 2014.

Razzaghi, F.; Zhou, Z.; Andersen, M. N.; Plauborg, F. Simulation of potato yield in temperate condition by the AquaCrop model. *Agricultural Water Management*, v. 191, p. 113-123, 2017.

Reis, L. S.; Azevedo, C. A. V. de; Albuquerque, A. W.; Junior, J. F. S. Índice de área foliar e produtividade do tomate sob condições de ambiente protegido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 386-391, 2013.

Sales, D. L. A. Evapotranspiração e coeficiente de cultura do tomateiro industrial estimado por sensoriamento utilizando o algoritmo Safer. 2016. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solo e Água) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

Santana, M. F. de; Vieira, T. A.; Barreto, A. C. Cruz, O. C. da. Resposta do Tomateiro Irrigado a Níveis de Reposição de Água no Solo. *Irriga*, Botucatu, v. 15, n. 4, p. 443-454, outubro-dezembro 2010.

Santana, M. J. de; Pereira, U. da C.; Beirigo, J. D. C.; Souza, S. S. De; Campos, T. M.; Vieira, T. A. Coeficientes de cultura para o tomateiro irrigado. *Irriga*, Botucatu, v. 16, n. 1, p. 11-20, 2011.

Silva, C. R. da; Andrade Júnior, A. S. de; Alves Júnior, J.; Souza, A. B. de; Melo, F. de B.; Coelho Filho, M. A. Calibration of a Capacitance Probe in a Paleudult. *Scientia Agricola*, v. 64, n. 6, p. 636-640, 2007.

Silva, J. A. da; Dutra, A. F.; Cavalcanti, N. M. da S.; Melo, A. S. de; Silva, F. G. da; Silva, J. M. da. Aspectos agronômicos do tomateiro “Caline Ipa 6” cultivado sob regimes hídricos em área do semiárido. *Revista Agro@mbiente On-line*, Boa Vista, v. 8, n. 3, p. 336-344, 2014.

Silva, T. G. F. da; Moura, M. S. B. de; Zolnier, S.; Soares, J. M.; Vieira, V. J. de S.; Júnior, W. G. F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 64-71, 2012.

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.

Sinclair, T. R.; Seligman, N. G. Crop modelling: From infancy to maturity. *Agronomy Journal*, v. 88, p. 698-704, 1996.

Smith, M.; Steduto, P. Yield response to water: the original FAO water production function. In: Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Fereres, E.; Raes, D. In: *Crop yield response to water*. FAO irrigation and Drainage Paper 66, Roma, Itália, 2012. Cap. 2, p. 6-13.

- Soares, L. A. dos A.; Brito, M. E. B.; Araújo, T. T. de; Sá, F. V. da S.; Silva, E. C. B. da. Morfofisiologia e qualidade pós-colheita do tomateiro sob estresse hídrico nas fases fenológicas. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, Mossoró, v. 8, n. 1, p. 239-246, 2013.
- Soares, L. A. dos A.; Lima, G. S. de; Brito, M. E. B.; Sá, F. V. da S.; Araújo, T. T. de. Crescimento do tomateiro e qualidade física dos frutos sob estresse hídrico em ambiente protegido. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, Mossoró, v. 6, n. 3, p. 203 – 212, 2011.
- Souza, C. F.; Pires, R. C. M.; Miranda, D. B. de; Varallo, A. C. T. Calibração de sondas FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. *Revista Irriga*, Botucatu, v. 18, n. 4, p. 597-606, 2013.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, v. 25, n. 3, p. 189-207, 2007.
- 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, n. 3, p. 426-437, 2009.
- Steduto, P.; Raes, D.; Hsiao, T. C.; Fereres, E. AquaCrop: concepts, rationale and operation. In: Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Fereres, E.; Raes, D. In: *Crop yield response to water*. FAO irrigation and Drainage Paper 66, Roma, Itália, 2012. Cap. 3 (3.1), p. 17-49.
- Tan, S.; Wang, Q.; Zhang, J.; Chen, Y.; Shan, Y.; Xu, D.; Performance of AquaCrop model for cotton growth simulation under film-mulched drip irrigation in southern Xinjiang, China. *Agricultural Water Management*, v. 196, p. 99-113, 2018.
- Tavares, A. L. Fenometria, produtividade e necessidades hídricas das culturas da alface e do coentro em clima tropical. 2016, 80 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- Teixeira, A. H. de C.; Bassor, L. H.; Reis, V. C. da S.; Silva, T. G. F. da; Ferreira, M. de N. L.; Maia, J. L. T. Estimativa do consumo hídrico da goiabeira, utilizando estações agrometeorológicas automática e convencional. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 457-460, 2003.
- Teixeira, A. H. de C.; Azevedo, P. V.; Silva, B. B. da; Soares, J. M. Consumo hídrico e coeficiente de cultura da videira na região de Petrolina, PE. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 413-416, 1999.
- Vanuytrecht, E.; Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Fereres, E.; Heng, L. K.; Vila, M. G.; Moreno, P. M. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling & Software*, v. 62, p. 351-360, 2014.
- Vieira, S. *Introdução à Bioestatística*. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008. 345 p.

- Villa Nova, N. A. V.; Favarin, J. L.; Angelocci, L. R.; Dourado-Neto, D. Estimativa do Coeficiente de Cultura do Cafeeiro em Função de Variáveis Climatológicas e Fitotécnicas. *Bragantia*, v. 61, n. 1, p. 81-88, 2002.
- Villalobos, F. J.; Fereres, E. Evaporation measurements beneath Corn, Cotton, and Sunflower Canopies. *Agronomy Journal*, v. 82, n. 6, p. 1153-1159, 1990.
- Viol, M. A.; Carvalho, J. de A.; Lima, E. M. de C.; Rezende, F. C.; Gomes, L. A. A. Efeito da salinidade no crescimento e produção do tomate cultivado em ambiente protegido. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, Fortaleza, v. 11, n. 8, p. 2120-2131, 2017.
- 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.
- Whisler, F. D.; Acock, B.; Baker, D. N.; Fye, R. E.; Hodges, H. F.; Lambert, J. R.; Lemmon, H. E.; Mckinon, J. M.; Reddy, V. R. Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy*, v. 40, p. 141–208. 1986.