



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**



TESE

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO IRRIGAÇÃO E DRENAGEM

FRANKLIN ALVES DOS ANJOS

**CULTIVO DO MILHO IRRIGADO NO SEMIÁRIDO ALAGOANO E
MODELAGEM COM O AQUACROP/FAO®**

CAMPINA GRANDE - PB

Dezembro - 2016

FRANKLIN ALVES DOS ANJOS

**CULTIVO DO MILHO IRRIGADO NO SEMIÁRIDO ALAGOANO E
MODELAGEM COM O AQUACROP/FAO®**

Orientadores:

Profº Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo - UFCG

Profº Dr. José Leonaldo de Souza - UFAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - CTRN da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

CAMPINA GRANDE - PB

Dezembro - 2016

A599c Anjos, Franklin Alves dos.
Cultivo do milho irrigado no semiárido alagoano e modelagem com o
AQUACROP/FAO® / Franklin Alves dos Anjos. – Campina Grande, 2016.
126 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2016.

"Orientação: Prof. Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo, José Leonaldo
de Souza ".

Referências.

1. Irrigação Agrícola. 2. *Zea mays* L. 3. Manejo de Água. I. Azevedo,
Carlos Alberto Vieira de. II. Souza, José Leonaldo de. III. Título.

CDU 631.67(043)

A Deus, por ter me concebido a oportunidade de habitar esse plano físico, à minha esposa Querolyn (Nina), às minhas filhas Sophia, Letícia e Lorena, aos meus pais Elias e Marinalva e aos meus irmãos Herbety (*In Memoriam*) e Wanrobety.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela determinação, confiança e perseverança para vencer os obstáculos da vida;

Aos meus orientadores Prof^o Carlos Azevedo e Prof^o Leonaldo, pela orientação e paciência no decorrer dessa jornada;

Aos colegas do laboratório: Cícero Manoel, Maurício Prado, Marshall Victor, Adolpho, Pedro Luan, Renato Araújo, Constantino, Ivomberg, Rener Ferraz, Cícero Teixeira, Joelmir e Sebastião Júnior, pela convivência e amizade;

Aos colegas de atividades de campo: Artur, Adriano Torres, Otavio Salgado, Vinícius Bittencour, Francisco de Atagnan e Ardiles Correia;

Aos colegas da turma de doutorado: Patrícia, Jailma, Rodrigo, Yolli, Pricila Targino e Marcelo;

Aos professores do Centro de Ciências Agrárias - CECA/ UFAL: Guilherme Bastos Lyra, Iêdo Teodoro, Gilson Moura Filho e Ricardo Araújo Ferreira Júnior, pelo auxílio no transcorrer dos experimentos;

Ao corpo docente do curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola - CTRN/ UFCG, em especial àqueles com os quais convivi: Prof^a. Dr^a. Vera, Prof^o. Dr. Carlos Azevedo, Prof^o. Dr. Hugo Guerra, Prof^a. Dr^a. Maria Sallydelândia, Prof^a. Dr^a. Soad e Prof^o. Dr. José Dantas;

Aos funcionários da secretaria de Pós-Graduação, Gilson, Dona Aparecida e Roberto;

Aos membros da banca pelas sugestões e correções para enriquecimento deste trabalho;

Meus cordiais e sinceros agradecimentos.

EPIGRAFE

“Quando você está realmente determinado, você pode
realizar muito mais do que você pensa”

Gabrielle Andersen-Schiess

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	i
SUMMARY	ii
1. INTRODUÇÃO GERAL	3
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1. A cultura do milho	4
2.2. Água como fator de produção.....	5
2.3. Atmosfera.....	7
2.4. Agricultura irrigada.....	9
2.5. Eficiência no uso da água-EUA.....	10
2.6. Modelagem na agricultura	12
2.7. O Modelo AquaCrop®	14
2.8. REFERÊNCIAS.....	15
3. METODOLOGIA GERAL	29
4. CAPÍTULO 1	49
4.1. Componentes de produção e eficiência de uso da água pelo milho sob irrigação no semiárido Alagoano	49
5. CAPÍTULO 2	69
5.1. Calibração do modelo AquaCrop/FAO® para a cultura do milho sob irrigação no semiárido Alagoano	69
6. CAPÍTULO 3	98
6.1. O milho híbrido AG7088 expressa maior potencial fisiológico e produtivo sob elevada reposição hídrica no semiárido	98
CONSIDERAÇÕES FINAIS	116

LISTA DE FIGURAS

METODOLOGIA GERAL

- Figura 1.** Localização da área experimental na Fazenda Tororó III, município de Pão de Açúcar, AL, 2015. 29
- Figura 2.** Estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia-INMET, Pão de Açúcar, AL, 2015. 30
- Figura 3.** Sistema de Plantio Direto e área dessecada (A) e adubação de fundação (B), para a área do experimento em Pão Açúcar, AL, 2015. 32
- Figura 4.** Croqui do experimento e parcela experimental. 33
- Figura 5.** Sistema de irrigação localizada por gotejamento (A) com emissores espaçados a cada 0,20 m (B) e conjunto de seis eletroválvulas (C) acionadas por programador de seis estações (D) Pão de Açúcar, AL, 2015. 34
- Figura 6.** Sistema de aquisição de dados CR1000 (A) e hastes afixadas no solo nas profundidades de 0,00-0,30 e 0,30-0,60 m (B), Pão de Açúcar, AL, 2015. . 35
- Figura 7.** Três sementes distribuídas por cova (A) e desbaste 10 dias após a semeadura (B). 35
- Figura 8.** Trincheiras (1,0x1,0x1,30m) na E2 durante a maturidade fisiológica (A), avaliação de massa seca pelo método destrutivo (B) na área experimental e secagem de massa seca (C) em estufa de ventilação forçada (D) no CECA-UFAL, Rio Largo, AL, 2015. 38
- Figura 9.** Número de espigas por parcela (A), comprimento de espiga (B), diâmetro de espiga (C) e número de grãos por linha (D), CECA-UFAL, Rio Largo, AL, 2015. 40
- Figura 10.** Amostras indeformadas de solo de 0,00-0,30 m (A) e 0,30-0,60 m (B), material destorroado e peneirado (C), adição de 250 ml de água às amostras de solo na bandeja (D), leitura do pulso elétrico no CR10 KD (*Campbell Science*) (E) e pesagem das latas de alumínio (F), CECA, UFAL, Rio Largo, AL, 2016. 41
- Figura 11.** Interface do modelo AquaCrop® versão 5.0 (A) e arquivo de entrada (B) de temperatura mínima e máxima do ar (Bloco de Notas, versão: 1607) (STEDUTO et al., 2009). 42
- Figura 12.** Menu principal do AquaCrop sub-dividido no macroambiente- cultura e meio ambiente e macroambiente simulação (STEDUTO et al., 2009). 44

Figura 13. Interface do usuário para valores de calibração para o desenvolvimento da cobertura do dossel do híbrido AG 7088 (STEDUTO et al., 2009).....	44
Figura 14. Período de crescimento reprodutivo e estádios de floração (STEDUTO et al., 2009).....	45
Figura 15. Coeficiente máximo de transpiração (K_{cb_x}) e estresse hídrico para expansão do dossel, híbrido AG 7088, Pão de Açúcar, AL, 2015 (STEDUTO et al., 2009).....	46
Figura 16. Irrigação por gotejamento com área molhada de 30% para Pão de Açúcar, AL, 2015 (STEDUTO et al., 2009).....	47
Figura 17. Características do perfil do solo para dois horizontes (0,00-0,30 e 0,30-0,60 m) classificação textural, para Pão de Açúcar, AL, 2015 (Steduto et al., 2009).....	48

CAPÍTULO 1

Figura 1. Componentes de produção: Massa de mil grãos (A), rendimento de grãos secos (B), número de grãos por linha (C), número de grãos por espiga (D), massa de sabugo (E) e massa de espiga de milho despalhada sob lâminas de irrigação suplementar no experimento 2.....	59
Figura 2. Projeção bidimensional das lâminas de irrigação (L), épocas experimentais (E) e das 12 variáveis nos componentes principais 1 x 2 (A e B) e 1 x 3 (C e D). $L_1E_1=19$ mm, $L_2E_1=28$ mm, $L_3E_1=38$ mm, $L_4E_1=47$ mm, $L_5E_1=56$ mm, $L_6E_1=66$ mm, $L_1E_2=229$ mm, $L_2E_2=343$ mm, $L_3E_2=458$ mm, $L_4E_2=572$ mm, $L_5E_2=687$ mm, $L_6E_2=801$ mm, $E_1=11/04/2015-11/08/2015$, $E_2=25/08/2015-25/12/2015$	61

CAPÍTULO 2

Figura 1. Temperatura máxima (Temp. Máx.) e mínima (Temp. Mín.), radiação (Rad.) e umidade relativa do ar (UR) para primeira (A) e segunda (B) época experimental em Pão de Açúcar, AL, 2015.....	72
Figura 2. Precipitação e irrigação durante o ciclo da cultura do milho, Pão de Açúcar, 2015, AL. E_1 : primeira época experimental; E_2 : segunda época experimental; e L: lâmina de irrigação.	73
Figura 3. Total de água no solo observado e simulado na camada de 0,0-0,60 m para estação de crescimento do milho na primeira época (E_1) experimental no semiárido Alagoano. L: lâmina de irrigação.	83
Figura 4. Armazenamento de água no solo observado e simulado na camada de 0,0-0,60 m durante o ciclo do milho na segunda época experimental em Pão de Açúcar, AL. L: lâmina de irrigação.	84

- Figura 5.** Cobertura do dossel observado (pontos) e simulado (linha sólida), para duas épocas de plantio (E₁ e E₂) do híbrido AG 7088 irrigado no semiárido Alagoano, 2015..... 85
- Figura 6.** Acúmulo de biomassa observada e simulada acima do solo para a cultura do milho na segunda época experimental em Pão de Açúcar, AL, 2015. 87
- Figura 7.** Relação linear (linha 1:1) da biomassa observada e simulada acima do solo para a cultura do milho na segunda época experimental em Pão de Açúcar, AL, 2015..... 88

CAPÍTULO 3

- Figura 1.** Variáveis meteorológicas registradas durante o período de condução do experimento. P: precipitação pluvial, T: temperatura média do ar, UR: umidade relativa do ar, RG: radiação global, AF: mensurações de área foliar, TG: mensurações de trocas gasosas, RG: quantificação do rendimento de grãos. Pão de Açúcar, AL, 2015..... 101
- Figura 2.** Projeção bidimensional (biplot) das lâminas de irrigação (●L) e nove variáveis (●) nos dois componentes principais (CP) 1 x 2. L₁=50% (229 mm), L₂=75% (343 mm), L₃=100% (458 mm), L₄=125% (572 mm), L₅=150% (687 mm) e L₆=175% (801 mm). A: taxa de assimilação de CO₂; g_s: condutância estomática; E: transpiração; DPV: déficit de pressão de vapor; TF: temperatura foliar; EIUA: eficiência instantânea do uso da água; AF: área foliar; IAF: índice de área foliar e RG: rendimento de grãos..... 107
- Figura 3.** Rendimentos de grãos observados (●RGO) e estimados (●RGE) pelo modelo de regressão múltipla em cada lâmina de irrigação. L₁=50% (229 mm), L₂=75% (343 mm), L₃=100% (458 mm), L₄=125% (572 mm), L₅=150% (687 mm) e L₆=175% (801 mm)..... 108

LISTA DE TABELAS

METODOLOGIA GERAL

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do solo da área experimental em Pão de Açúcar, AL, 2015. 31

Tabela 2. Atributos químicos da água de irrigação em Pão de Açúcar, AL, 2015. 36

CAPÍTULO 1

Tabela 1. Variáveis meteorológicas obtidas durante os períodos de execução do experimento em Pão de Açúcar, AL, 2015. 52

Tabela 2. Atributos físicos e químicos do solo da área experimental em Pão de Açúcar, AL, 2015. 52

Tabela 3. Resumo das análises de variância para as variáveis: massa de mil grãos (MMG, g), número de espigas por parcela (NEP, unidades), rendimento de grãos secos (RGS, kg ha⁻¹), comprimento de espiga (CES, cm), diâmetro de espiga (DES, mm), número de linhas por espiga (NLE, unidades), número de grãos por linha (NGL, unidades), número de grãos por espiga (NGE, unidades), massa de grãos por espiga (MGE, g), massa de sabugo (MAS, g), massa de espiga despalhada (MED, g) e massa de palhas (MPA, g) de milho sob lâminas de irrigação em Pão de Açúcar, AL, 2015. 57

Tabela 4. Autovalores maiores que a unidade, porção da variância explicada e coeficientes de correlação entre os componentes principais das 12 variáveis. Pão de Açúcar, AL, 2015. 60

Tabela 5. Eficiência de uso da água (kg m⁻³) pelo milho sob lâminas de irrigação suplementar. Pão de Açúcar, AL, 2015. 62

CAPÍTULO 2

Tabela 1. Atributos físicos do solo da área experimental. Pão de Açúcar, AL, 2015. ... 71

Tabela 2. Descrições dos dados de entrada da cultura do milho usados no AquaCrop® para simulação no semiárido em Pão de Açúcar, AL, 2015. 79

Tabela 3. Índice de colheita, biomassa acumulada, rendimento de grãos simulados e observados e desvio percentual (%) para o milho em duas épocas de plantio para seis lâminas de irrigação em Pão de Açúcar, AL, 2015. 86

CAPÍTULO 3

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do solo da área experimental. Pão de Açúcar, AL, 2015. 101

Tabela 2. Autovalores maiores que a unidade, porção da variância explicada, probabilidade de significância do efeito de lâminas de irrigação e coeficientes de correlação entre os componentes principais e nove variáveis originais. 106

CULTIVO DO MILHO IRRIGADO NO SEMIÁRIDO ALAGOANO E MODELAGEM COM O AQUACROP/FAO®

Autor: Franklin Alves dos Anjos

RESUMO GERAL

O milho é utilizado para diversas finalidades, com ênfase para alimentação humana, ração animal e matéria prima de bioetanol. Contudo, os ecossistemas de cultivo são variáveis quanto às condições edafoclimáticas, fazendo-se necessário uso de tecnologias que viabilizem seu cultivo em diferentes locais. O uso de híbridos, associado ao adequado manejo de água no solo e técnicas de previsão para produção de biomassa e rendimento, são imprescindíveis para o sucesso na colheita do cereal. Assim, objetivou-se analisar os componentes de produção e eficiência de uso da água, verificar a adequabilidade de análise multivariada para evidenciar informações relevantes para este estudo, calibrar o modelo AquaCrop/FAO® para as condições agroclimáticas de Pão de Açúcar, AL, e relacionar as trocas gasosas ao rendimento de grãos como estratégia para auxílio na tomada de decisões acerca do cultivo de milho sob lâminas de irrigação. Foram realizados dois experimentos em duas épocas experimentais distintas, entre os meses de abril a dezembro de 2015, em delineamento de blocos ao acaso com seis lâminas de irrigação e quatro repetições. Os componentes de produção e eficiência de uso da água do milho não foram influenciados estatisticamente pela variação de lâminas de irrigação na primeira época experimental. Na segunda época, o aumento das lâminas promoveu ganhos na massa de mil grãos, rendimento de grãos secos, número de grãos por linha, número de grãos por espiga, massa de sabugo e massa de espiga despalhada, reduzindo a eficiência do uso da água. O emprego de análise multivariada foi eficiente para evidenciar diferenças entre lâminas de irrigação e épocas experimentais. O modelo AquaCrop/FAO® foi calibrado para a cultura do milho híbrido AG 7088 cultivado sob lâminas de irrigação nas condições agroclimáticas de Pão de Açúcar no Semiárido, evidenciando boa performance, exatidão e qualidade de ajuste do modelo entre valores observados e simulados. O híbrido AG 7088 teve bom desempenho fisiológico sob irrigação plena (100% da ET_0), com produção de $5,75 \text{ t ha}^{-1}$, sendo a mensuração de trocas gasosas importante para previsão do rendimento da cultura, de modo a subsidiar estratégias de cultivo nas safras futuras.

Palavras-chave: *Zea mays* L., Manejo de água, Modelagem, Biomassa, Rendimento.

CULTIVATION OF IRRIGATED CORN IN ALAGOAN SEMIARIDES AND MODELING WITH AQUACROP/FAO®

Author: Franklin Alves dos Anjos

SUMMARY

Corn is used for various purposes, with emphasis on human food, animal feed and bioethanol feedstock. However, the ecosystems of cultivation are variable as far as the edaphoclimatic conditions are concerned, making necessary the use of technologies that allow their cultivation in different places. The use of hybrids, associated with adequate soil water management and prediction techniques for biomass production and yield, are essential for the successful harvesting of the cereal. The objective of this study was to analyze the components of production and water use efficiency, to verify the suitability of multivariate analysis to evidence relevant information for this study, to calibrate the AquaCrop/FAO® model for the agroclimatic conditions of Pão de Açúcar, AL, and to relate gaseous exchange to grain yield as a strategy to aid decision making on maize cultivation under irrigation depths. Two experiments were carried out in two different experimental periods between April and December 2015, in a randomized block design with six irrigation depths and four replications. The production components and efficiency of maize water use were not statistically influenced by the variation of irrigation depths in the first experimental period. In the second season, the increase of the depths promoted gains in the mass of a thousand grains, yield of dry grains, number of grains per row, number of grains per spike, mass of cob and debris spike mass, reducing the efficiency of water use. The use of multivariate analysis was efficient to show differences between irrigation depths and experimental times. The AquaCrop/FAO® model was calibrated for AG 7088 hybrids cultivated under irrigation depths in the Pão de Açúcar agro-climatic conditions in the semi-arid region, showing good performance, accuracy and fit quality of the model between observed and simulated values. The hybrid AG 7088 had a good physiological performance under full irrigation (100% of ET_0), with a yield of 5.75 t ha^{-1} , being the gas exchange measurement important for predicting crop yield, in order to subsidize crop strategies in future crops.

Key words: *Zea mays* L., Water management, Modeling, Biomass, Yield.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O milho (*Zea mays* L.) figura entre os principais cereais produzidos em todo o globo terrestre, sendo utilizado tanto como ração animal quanto para alimentação humana, o que se justifica por seu potencial nutricional e elevada capacidade de produção (PARIZI et al., 2016). Apesar de sua expressividade, o cultivo de milho ainda padece com ocorrência de estresses abióticos proeminentes dos ecossistemas de cultivo, notadamente nas regiões semiáridas do Brasil, onde o fator de produção água é limitado (CIRILO et al., 2017). A disponibilidade hídrica é um fator primordial à produção, uma vez que a sua limitação reduz o rendimento de milho, denotando a necessidade de avanço em estudos que relacionem o fator água ao crescimento, componentes de produção e eficiência de uso da água e de nutrientes (CHILUNDO et al., 2017).

Nesse cenário de instabilidade climática e limitação de recursos hídricos, elevar a produção de milho configura uma estratégia para segurança alimentar no mundo. A esse respeito, é preciso produzir alimentos em quantidades suficientes para alimentar a população que dobrou entre 1980 e 2010 e deverá dobrar novamente até 2050, seguindo o exemplo da América Latina e Ásia que triplicaram a produtividade passando de uma tonelada para quatro toneladas por hectare (AKUMAGA et al., 2017). Estes pesquisadores reportam que o investimento em tecnologias de cultivo pode refletir em incremento de produtividade e propondo a utilização de modelagem no cultivo de milho verificaram que os rendimentos simulados superestimam os observados, sendo esta situação recorrente, denotando necessidade de calibração adicional do modelo; e que os resultados da produção de grãos e acúmulo de biomassa foram consistentes ratificando a eficácia do modelo.

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas para maior compreensão e tomada de decisões acerca das nuances no cultivo de milho, com foco na interação entre genótipos e ambientes, refletindo diretamente na adaptabilidade e estabilidade dos genótipos (SANTOS, 2016); maior eficiência no uso da água pelas plantas (MESSINA et al., 2015); manejo de fertilizantes e irrigação (CHILUNDO et al., 2017). Ressalte-se que, embora existam pesquisas sobre milho irrigado no Brasil (PARIZI et al., 2016; SOUZA et al., 2016; VIAN et al., 2016), e em Alagoas (ANJOS, 2011), faz-se necessário emprego do modelo AquaCrop[®] como estratégia para tomada de decisões acerca do cultivo de milho, visando ganho de produção e eficiência no uso da água em Pão de Açúcar, AL.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A cultura do milho

O milho é uma das culturas mais importantes que a humanidade conhece, respondendo por quase 30% da produção global total de grãos. A cultura é cultivada em mais de 158 milhões de hectares de terra no mundo, produzindo mais de 516 milhões de kg de grãos (FAOSTAT, 2009; SOUZA FILHO et al., 2016). Recentemente, a procura de milho tem vindo a aumentar, uma vez que é usado para produzir bioetanol, além de ser um alimento básico em muitos países e servir de alimentação para animais na forma de forragem, silagem ou grãos (ABBAS et al., 2017; MURASHIKI et al., 2017).

A demanda por grãos e produtos de milho pressiona a produção do cereal, evidenciando maior consumo dos recursos naturais para atender as exigências dos cultivos. Salienta-se que o aumento em expressividade de área cultivada está diretamente relacionado à redução da disponibilidade hídrica, notadamente em virtude da maior extração deste recurso pela cultura (MURGA-ORRILLO et al., 2016). Melhorar a eficiência do uso da água para produção de milho é de fundamental importância para se obter maior produtividade da cultura considerando o declínio dos recursos hídricos em todo o mundo e a incerteza na precipitação pluvial decorrente da mudança climática global (HENG et al., 2009; ABRAHA et al., 2016).

As últimas 10 safras de milho mudaram o conceito do Brasil no mercado mundial. O País, que antes era um importador, passou à condição de segundo maior exportador, superado apenas pelos Estados Unidos. O rendimento dobrou com o avanço tecnológico de cultivares transgênicas e de híbridos de alta produtividade. A chamada safrinha, nas regiões Centro-Oeste e Sudeste e nos estados do Paraná e da Bahia, consolida um reforço de produção que equivale a dois terços da safra de verão, que até a pouco mais de uma década era a única no território nacional. Essa diferença fez o Brasil se tornar autossuficiente e gerou excedentes que o elevaram à potência na colheita e na comercialização do cereal (ANUÁRIO BRASILEIRO DO MILHO, 2011).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, sendo superado apenas pelos Estados Unidos e China. Até setembro de 2016, a estimativa de área semeada no Brasil na safra 2015/2016 foi cerca de 15,9 milhões de ha, conferindo produtividade média de 4.207 kg ha⁻¹, totalizando 67 milhões de toneladas de grãos. Desse montante, a

região Nordeste foi responsável por mais de 3,5 milhões de toneladas, em uma área correspondente acima dos 2,4 milhões de ha, apresentando produtividade de 1.484 kg ha⁻¹, tendo Alagoas apresentado produtividade de 674 kg ha⁻¹ (CONAB, 2016).

Na maioria das regiões produtoras, a cultura do milho vem sendo conduzida sob condições climáticas favoráveis. O milho é cultivado em praticamente todo o território nacional, sendo que 90% da produção está concentrada nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. O milho é insumo para produção de uma centena de produtos, porém na cadeia produtiva de suínos e aves são consumidos aproximadamente 70% do milho produzido no mundo e entre 70 e 80% do milho produzido no Brasil (EMBRAPA, 2010).

Na safra 2015/2016, na região que engloba os estados de Alagoas e Sergipe e nordeste da Bahia, onde o milho segunda safra estava em fase de frutificação, os volumes de chuva acumularam-se na faixa entre 20 e 70 mm. Essa baixa quantidade de chuvas em agosto manteve a condição de déficit hídrico durante o período de abril a julho, comprometendo o rendimento de grãos, uma vez que neste estágio fenológico a escassez hídrica pode reduzir de 20 a 50% a produtividade (PEGORARE et al., 2009). Em Palmeira dos Índios, agreste alagoano, o acumulado do mês de agosto foi de aproximadamente 15 mm. Com situação semelhante, em Propriá, Sergipe, o total foi inferior a 40 mm (CONAB, 2016).

2.2. Água como fator de produção

Atualmente, inúmeras discussões têm sido levantadas acerca das ações antrópicas e seus reflexos negativos para a o meio ambiente. O cerne destas discussões tem sido o ponto de partida para as nações chegarem ao denominador de que os recursos naturais são finitos e precisam de atenção especial (AAMAAS & PETERS, 2017), denotando o caráter emergencial de estratégias de manejo otimizado da água.

Em grande parte do mundo, a água sempre foi o principal fator limitante à produção agrícola, onde as chuvas não são suficientes (SCHAIBLE & AILLERY, 2017). Com os recentes aumentos na demanda das commodities agrícolas e a crise alimentar, que se seguiu em países pobres e em desenvolvimento, a necessidade de melhorar a eficiência do uso da água na produção agrícola tornou-se mais evidente (HSIAO et al., 2007; BENTON, 2017).

A produtividade de uma cultura agrícola está condicionada a vários fatores referentes ao solo, à planta e ao clima. Dentre estes, a água é um fator essencial e seu manejo racional é fundamental na otimização da produção agrícola. Em função da quantidade utilizada, a água proporciona variação na produtividade da cultura e na qualidade do produto. Atualmente, a utilização racional dos recursos empregados na agricultura é uma necessidade, de modo a garantir sua disponibilidade para uso futuro (DELGADO et al., 2010). Frizzone et al. (2005) afirmaram que a produtividade pode ser expressa exclusivamente em função da água utilizada pelo cultivo, estando todas as outras variáveis inerentes à produtividade em nível ótimo.

O decréscimo na disponibilidade de água no solo ocasiona queda no potencial da água na folha, diminuindo a turgidez celular, a condutância estomática (SHALHEVET, 1993) e a transpiração (RAY & SINCLAIR, 1997; TAIZ & ZEIGER, 2013). A redução na taxa de assimilação de CO₂ durante o déficit hídrico é atribuída, em grande parte, à diminuição da abertura estomática em resposta à redução da disponibilidade de água no solo (ROSA et al., 1991). Chaves (1991) observou que, dependendo da espécie e da intensidade da desidratação, a assimilação de carbono pode diminuir a valores próximos de zero. Por outro lado, em plantas sem restrição hídrica, a condutância estomática pode aumentar com a diminuição do potencial de água na folha, resultando de uma maior taxa de transpiração à medida que a abertura estomática aumenta (JONES, 1992; BRITO et al., 2013).

A cultura do milho exige um mínimo de 400-600 mm de precipitação pluvial para que possa manifestar seu potencial produtivo, porém este volume é variável, principalmente em função da região de cultivo e das condições edafoclimáticas. O consumo de água geralmente oscila entre 4 e 6 mm dia⁻¹ (FANCELLI & DOURADO NETO, 2004; MALVESTITI, 2013). O volume de precipitação não é considerado como bom indicador de disponibilidade hídrica para cultura, pois esta depende do padrão de distribuição das chuvas, tipo de solo, umidade relativa do ar, entre outros fatores que interferem na retenção de água no solo e evapotranspiração da cultura (GALON et al., 2010). A quantidade de água disponível para cultura encontra-se na dependência da profundidade explorada pelas raízes, da capacidade de armazenamento de água do solo (CAD) e da densidade radicular da planta. Assim, o manejo do solo e da cultura apresenta importância para o crescimento e distribuição do sistema radicular, e dessa forma,

favorece o aproveitamento eficiente da água no processo produtivo. A ocorrência de moderada deficiência de água, no início do desenvolvimento da cultura, pode concorrer para estimular um maior desenvolvimento radicular das plantas, desde que o solo, abaixo de 20 cm da superfície, tenha água armazenada e disponível às plantas (MANFRON et al., 2003).

Para o milho, as maiores exigências em água se concentram na fase de emergência, florescimento e enchimento de grãos (FANCELLI, 2015). Todavia, no período compreendido entre 15 dias antes e 15 dias após o aparecimento da inflorescência masculina, o requerimento de suprimento hídrico satisfatório, aliado a temperaturas adequadas, torna tal período extremamente crítico. O consumo de água por parte do milho, em clima quente e seco, raramente excede $3,0 \text{ mm dia}^{-1}$, enquanto a planta estiver com altura inferior a 30 cm. Entretanto, durante o período compreendido entre o espigamento e a maturação, o consumo pode aumentar para $5,0 \text{ mm dia}^{-1}$, podendo chegar a $7,5 \text{ mm dia}^{-1}$ (FANCELLI & DOURADO NETO, 2004). Os modelos de simulação que quantificam os efeitos da água sobre o rendimento são ferramentas importantes para o manejo da água e da irrigação.

2.3. Atmosfera

A energia luminosa é de fundamental importância, pois a adaptação das plantas ao ambiente depende do ajuste do seu aparelho fotossintético, de modo que a luminosidade ambiental seja utilizada de maneira mais eficiente possível. As respostas destas adaptações serão refletidas no crescimento global da planta (ENGEL & POGGIANI, 1991). A disponibilidade de radiação solar é um dos fatores que mais limitam o crescimento e desenvolvimento das plantas. Toda energia necessária para realização da fotossíntese, processo que transforma o CO_2 atmosférico em energia metabólica, é proveniente da radiação solar (TAIZ & ZIEGER, 2013). A maior ou menor adaptação das espécies às diferentes condições de radiação solar depende do ajuste de seu aparelho fotossintético, de modo a garantir maior eficiência de uso da radiação na produção de fotoassimilados, refletindo em maior produtividade de grãos (VILELA & RAVETTA, 2000).

A interceptação da luz pelo dossel é dependente, além da densidade e do arranjo das plantas, de um conjunto de características morfológicas dos vegetais como: estatura

e número de plantas, área foliar, distribuição e ângulo foliar (MARCHÃO et al., 2006). Híbridos modernos de milho possuem ângulo de inserção foliar menor, ou seja, folhas mais eretas que possibilitam melhor distribuição da radiação no dossel, ocasionando maior eficiência no uso deste recurso, além de proporcionar incremento na utilização de fertilizantes, aplicação de herbicidas, adoção do sistema de plantio direto, além de outros fatores que favorecem o cultivo adensado. As plantas que interceptam elevada quantidade de luz na fase inicial de desenvolvimento apresentam maior sucesso competitivo (FLECK et al., 2003). Maiores índices de área foliar em milho, obtidos com alteração do espaçamento entre linhas, podem não alterar a quantidade de radiação solar interceptado devido ao maior sombreamento potencial do extrato inferior do dossel (STRIEDER et al., 2008).

A interceptação da radiação solar está relacionada com o índice de área foliar (IAF), por funções exponenciais. O IAF que determina a taxa máxima de crescimento é conhecido como IAF crítico, o qual varia em função do ambiente que a planta estiver submetida. O IAF crítico para a cultura do milho oscila entre valores de 3 a 5, de acordo com a região, híbridos e sistema de produção considerado (FANCELLI & DOURADO NETO, 2004). Para manifestação da capacidade produtiva, é necessário que a planta apresente de 85 a 90 % do IAF crítico. A escolha adequada do arranjo das plantas é uma das práticas de manejo mais importantes para otimizar o rendimento de grãos de milho, pois afeta diretamente a interceptação de radiação solar, que é um dos principais fatores determinantes da produtividade. A redução da radiação é um fenômeno normal em períodos chuvosos ou de nebulosidade (OLIVER & RIBEIRO, 2014). A área foliar fotossinteticamente ativa pode ser reduzida em função do ataque de pragas ou doenças, bem como o enrolamento das folhas devido à ocorrência de estresse hídrico durante o crescimento e desenvolvimento da cultura do milho (KUNS et al., 2007).

Em sentido complementar, outro aspecto importante para o desenvolvimento pleno do milho, é a temperatura, a qual constitui-se no principal elemento climático que influencia diretamente na duração dos subperíodos de desenvolvimento das plantas. O fator temperatura é a principal causa de variações na duração do ciclo vegetativo do milho, notadamente na ausência de deficiência hídrica acentuada (GARCIA et al., 2013). O conhecimento da disponibilidade térmica de determinada localidade é de suma

importância para definir épocas adequadas de semeadura e, conseqüentemente, diminuir os riscos à produção (SILVA et al., 2007).

2.4. Agricultura irrigada

Nas últimas cinco décadas, a demanda por recursos hídricos tem aumentado expressivamente, seja para suprimento da demanda em atividades humanas ou para serviços ambientais. Esse aumento decorre do crescimento populacional e econômico, refletindo em mudanças sociais, sobretudo na percepção humana sobre a importância da água nos ecossistemas, o que tem despertado interesse da comunidade científica e população em geral a adotarem sistemas de gerenciamento de água mais eficientes. Salienta-se que, na agricultura irrigada, são consumidos aproximadamente 85% do total de água captada, inferindo que a sustentabilidade dos campos irrigados depende da adoção de sistemas de irrigação com maior eficiência de aplicação de água nas culturas (SCHAIBLE & AILLERY, 2017).

O desenvolvimento da agricultura irrigada é necessário para o suprimento das crescentes necessidades alimentares da população mundial em expansão, de modo a garantir a segurança alimentar no Planeta (BOWMER & MEYER, 2014; DAS et al., 2015). Todavia, a prática da irrigação continuará sendo importante no mundo, sobretudo devido a sua expressiva contribuição para produção de alimentos, que tende a aumentar a partir do nível atual de 40% para mais de 45% em 2030, principalmente em regiões semiáridas onde a precipitação anual é irregular no tempo e no espaço (PERAGÓN et al., 2015; SHAMIR et al., 2015). No entanto, a intensificação da agricultura irrigada pode ocasionar salinização dos solos em regiões áridas e semiáridas, onde mais de 75% da população do mundo vive. Esse cenário torna evidente que, de fato, o uso de recursos hídricos para atividade de irrigação deve ser otimizado (SINGH, 2016).

O conhecimento das áreas irrigadas e sua distribuição geográfica no Brasil é de fundamental importância para o planejamento da gestão de recursos hídricos do país. O Brasil apresenta atualmente uma área de 4,45 milhões de hectares irrigados, ocorrendo aumento de 1,3 milhões de hectares na área irrigada, ou seja, 42%. Nos últimos 10 anos, a região Sudeste ultrapassou a região Sul, que possuía a maior área irrigada, enquanto que a região Nordeste ocupa o terceiro lugar neste ranking com 22,12%. Já as regiões Centro-Oeste e Norte somam juntas apenas 14,7%. O método de irrigação mais utilizado,

segundo a classificação do censo agropecuário 2006, é o de aspersão (sem considerar o pivô), seguido pela inundação, pivô central, outros, localizada e sulco, representando 35,3%, 24,4%, 18,9%, 8,3%, 7,4% e 5,8%, respectivamente (PAULINO et al., 2011).

O Brasil detém um potencial da ordem de 14% das capacidades mundiais de incorporação de novas áreas à agricultura irrigada. As possibilidades de desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada no Brasil levaram em conta a existência de solos aptos a disponibilidade de recursos hídricos sem risco de conflitos com outros usos prioritários da água e o atendimento às exigências da legislação ambiental e do Código Florestal, resultando no potencial, por estado, que caracteriza a diversidade dos ecossistemas brasileiros e capacidades de suporte à expansão da agricultura irrigada de forma sustentável (CHRISTOFIDIS, 2013).

Em síntese, é inquestionável o aumento da produção de alimentos e fibras, pela adoção da agricultura irrigada, em regiões áridas e semiáridas do Globo, como também é inquestionável o impacto que a agricultura irrigada pode gerar ao meio ambiente se práticas adequadas de manejo do capital natural não forem adotadas. Muitas vezes, a implantação da irrigação tem promovido em larga escala mudanças no regime hidrológico local, resultando no acúmulo de sais na superfície do solo, ascensão do lençol freático, depleção dos aquíferos e contaminação dos recursos hídricos. Estas informações reforçam a necessidade do aprofundamento de pesquisas visando otimização dos sistemas de irrigação, de modo a promover maior eficiência no uso dos recursos hídricos (ANDRADE, 2009).

2.5. Eficiência no uso da água-EUA

Dentre as principais respostas ambientais às ações antrópicas, a mudança da temperatura vem ganhando importância no cenário internacional, sobretudo pelo fato das alterações climáticas afetarem drasticamente os sistemas sociais e naturais, notadamente no âmbito da produção das culturas em sistemas de sequeiro e irrigados (VIEIRA et al., 2017; WANG et al., 2017). Assim, a comunidade científica tem mobilizado esforços para desenvolvimento de estratégias para mitigação das perdas de água, de modo a elevar a eficiência do uso deste recurso, particularmente em regiões com escassez hídrica (KATERJI et al., 2010).

Em prospecção acerca de abordagens que tratam do tema eficiência de uso da água (EUA), verifica-se que a literatura é vasta e tem evoluído no número de publicações (ZWART & BASTIAANSEN, 2004; DENG et al., 2006; MOLDEN & OWEIS, 2007; HSIAO et al., 2007; KATERJI et al., 2008; KHAN et al., 2009; KATERJI et al., 2010). Acrescente-se que a literatura pertinente às respostas da cultura do milho irrigado com baixos volumes também é numerosa. Trabalhos recentes sobre este tema foram publicados por Ben Nouna et al. (2000), Karam et al. (2003), Farré & Faci (2006), Payero et al. (2006), Payero et al. (2008), Farré & Faci (2009) e Valenzuela (2009).

Nos estudos supracitados, a eficiência do uso da água é avaliada a partir da razão entre rendimento e água consumida. Dependendo dos objetivos do estudo, seja investigação ou gestão (BLÜMLING et al., 2007), o uso da água pode definir as quantidades de água fornecidas pela irrigação utilizada durante o período vegetativo (FARRÉ & FACI, 2006; FARRÉ & FACI, 2009), evapotranspiração sazonal (PAYERO et al., 2008) e, em poucos casos, transpiração sazonal (VAZIFEDOUST et al., 2008).

A irregularidade na distribuição das chuvas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho pode desequilibrar o agroecossistema e comprometer o rendimento da cultura (LI & SUN, 2016). Embora haja considerável volume de informações sobre a demanda hídrica da cultura, faz-se necessário demonstrar aspectos relacionados à utilização da água pelo milho, buscando-se evidenciar os mecanismos de ajuste das plantas para maior eficiência do uso da água e elevação da produção real a valores próximos do potencial produtivo (ZHANG et al., 2014; VAUGHN et al., 2016).

A eficiência do uso da água está relacionada à estratégia utilizada para fornecimento deste recurso via irrigação (LI & SUN, 2016). Estes pesquisadores reportam que a aplicação de lâminas de irrigação inferiores a 100% da demanda pode aumentar a eficiência de uso. De fato, essa otimização da EUA é possível, principalmente em situações de cultivo com elevados custos de insumos e recurso pessoal, além da limitação de recursos hídricos (IQBAL et al., 2014).

Quando cultivadas em condições estressantes, as plantas têm suas respostas fisiológicas modificadas, dependendo da duração, severidade e da fase fenológica de ocorrência (MOURA et al., 2006). Nessa perspectiva, torna-se imprescindível lançar mão de indicadores da eficiência do uso de água como forma de analisar a resposta dos cultivos às diferentes condições de disponibilidade de água, pois a EUA relaciona a produção de

biomassa ou a produção comercial com a quantidade de água aplicada ou evapotranspirada pela cultura (LIU & STUZEL, 2004; PUPPALA et al., 2005).

Em cultivo de milho no sistema de plantio solteiro, Souza et al. (2011) verificaram que a eficiência no uso da água aumentou com o incremento da lâmina de água aplicada, sendo a maior EUA obtida com a lâmina de 125%, sendo tal comportamento explicado pelo fato da cultura do milho ter maior resposta produtiva ao incremento do volume de água. Todavia, Schittenhelm (2010), estudando o efeito do baixo suprimento hídrico no milho, relatou que maior EUA é obtida com as menores lâminas aplicadas. Esta informação é ratificada por Brito et al. (2013) que também constataram maior eficiência aplicando menores volumes de água.

2.6. Modelagem na agricultura

Modelo é a representação simplificada de um sistema, enquanto simulação é a arte de construir modelos (WIT, 1982). A simulação é uma ferramenta útil para prever resultados de ensaios ou ações que não foram testados experimentalmente. Os modelos podem ser classificados como determinísticos ou estocásticos. O primeiro é quando, dadas às condições de experimentação, pode-se prever o resultado final do experimento, enquanto que o último não é possível prever, com certeza, o resultado antes da realização do experimento (ANJOS, 2011). Whisler et al. (1986) ordenaram em três categorias básicas as razões à construção de modelos: (a) como auxílio na interpretação de resultados experimentais; (b) como ferramenta à pesquisa agrônômica; (c) como ferramenta de desenvolvimento agrônômico. Segundo os mesmos autores, muitos modelos de cultivo ou parte deles foram construídos para ajudar o pesquisador a entender a operação de alguma parte de um sistema agrônômico, como o fluxo de água no solo, controle de abertura e fechamento dos estômatos, movimento de nutrientes no solo e o crescimento e desenvolvimento de uma cultura.

Nas últimas décadas, diversos modelos para previsão de safra das principais culturas foram desenvolvidos baseados em processos fisiológicos e estatísticos (FRANCE & THORNLEY, 1984; COSTA, 1988; COSTA et al., 2001). Tais modelos simulam o crescimento e desenvolvimento das plantas, usando como parâmetro a fotossíntese, respiração, produção de biomassa, produtividade de grãos e outros. Posteriormente, modelos minuciosos e mais avançados foram construídos, alguns deles

mais voltados à escala de plantas individuais, tais como CERES (JONES & KINIRY, 1986) e outros ao nível de copa, como EPIC (WILLIAMS et al., 1989), sua derivação ALMANAQUE (KINIRY et al., 1992) e o CropSyst (STOCKLE et al., 2003), servindo como ferramenta de gestão para auxiliar na tomada de decisão.

Dependendo da finalidade e objetivos da modelagem de cultura, podem-se distinguir duas principais abordagens: científica e engenharia. A primeira auxilia na compreensão sobre o comportamento das culturas, sua fisiologia e suas respostas às mudanças ambientais, enquanto que a segunda oferece consultoria de gestão ou previsões para decisões futuras (PASSIOURA, 1996). A modelagem científica é também destinada a ser mais mecanicista baseada em leis e teorias sobre como o sistema funciona, enquanto os modelos de engenharia são feitos para serem funcionais com base em uma mistura de teorias robustas e relações empíricas, como denominadas por Addiscott & Wagenet (1985).

A utilização de previsões meteorológicas em modelos de produção localmente adaptados e testados permite explorar distintas alternativas de gestão, como datas de semeadura, calendarização da rega, fertilizações ou data de colheita, numa grande gama de condições climáticas (PAREDES et al., 2015). No entanto, às distintas alternativas de gestão estão associados riscos que se refletem no rendimento da exploração agrícola (APIPATTANAVIS et al., 2010; CHOI et al., 2015). Em diversas pesquisas são utilizados modelos para apoio à gestão e decisão, como CERES incluído no DSSAT, utilizado por Baigorria et al. (2008), Apipattanavis et al. (2010) e D'orgeval et al. (2010); o modelo STICS utilizado por Dumont et al. (2015); o EPIC usado por Balkovic et al. (2013); o WOFOST empregado por Cantelaube & Terres (2005), Marletto et al. (2007) e Bussay et al. (2015) e o AquaCrop[®] utilizado por Zinyengere et al. (2011) para previsões climáticas visando apoiar a tomada de decisão para cultivo de milho no Zimbabwe.

Na cultura do milho, técnicas de modelagem foram empregadas visando: estimar o desempenho agrônômico da cultura em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil (MINUZZI & LOPES, 2015); estimar o desenvolvimento de cultivares crioulas e melhoradas de milho em função da temperatura do ar (LANGNER et al., 2016); mapeamento associativo para múltiplos ambientes e múltiplos locus, visando tolerância à seca em milho (ANONI, 2016); a predição genômica de híbridos de milho para

caracteres de arquitetura oligogênica (GALI, 2016); e a estimativa de produção em áreas irrigadas sob cultivo de milho utilizando imagens de satélite (OLIVEIRA et al., 2016).

2.7. O Modelo AquaCrop®

O AquaCrop® (RAES et al., 2009), versão 3.0, incorpora os conhecimentos atuais das respostas fisiológicas das culturas em uma ferramenta que pode prever a biomassa e a produtividade possível das plantas cultiváveis em resposta a água disponível. O modelo é destinado a uma ampla variedade de culturas herbáceas, incluindo as forrageiras, hortaliças de folhas, grãos, frutas, raízes e tubérculos. Também, estabelece um equilíbrio entre precisão, simplicidade, robustez e facilidade de uso, sendo destinado a usuários práticos, tais como especialistas em extensão, gestores de recursos hídricos, economistas e especialistas em políticas públicas que utilizam modelos simples para planejamento e análise de cenário (HSIAO et al., 2009). Como em outros modelos, as estruturas do AquaCrop® no continuum solo-planta-atmosfera, apresentam o solo com o balanço hídrico, a planta com seu crescimento, desenvolvimento e processos de produção e atmosfera (chuvas, demanda evaporativa e concentração de dióxido de carbono). Além disso, alguns aspectos de manejo são explícitos, com ênfase na irrigação, níveis de fertilidade do solo afetando o desenvolvimento das culturas, produtividade de biomassa em relação ao uso da água, ajustes das culturas ao estresse hídrico e, portanto, o rendimento final. Pragas e doenças não são consideradas.

Algumas características distinguem o AquaCrop® dos outros modelos, tais como: a) a escala de tempo, na qual a mesma se dá para medidas de tempo diária, um período próximo para se aproximar da escala de tempo da resposta da cultura ao déficit hídrico, b) não há separação de biomassa entre os vários órgãos da planta, esta distinção evita lidar com a complexidade e as incertezas associadas aos processos de separação, que permanecem entre os menos entendidos e mais difíceis de modelar, c) o desenvolvimento da folhagem da cultura é expressa através da Cobertura do Dossel (CD) e não através do Índice de Área Foliar (IAF), ela introduz uma simplificação significativa na simulação, consolidando o crescimento expansivo da folha, ângulo e distribuição para uma função de crescimento global, permitindo que o usuário insira os valores reais da CD; e d) o uso da produtividade de biomassa padronizada em relação ao uso da água (WP) para demanda evaporativa atmosférica e concentração de CO₂, que conferem ao modelo uma extensa

capacidade de extrapolação, para diversas localidades, estações e clima, incluindo cenários climáticos futuros (STEDUTO et al., 2009).

Recentemente, em outubro de 2015, foi lançada uma nova versão do modelo AquaCrop® (v. 5.0). Nessa nova versão, foram incluídas atualizações e novas funcionalidades, dentre as quais pode-se mencionar: atualização dos resultados referentes à cobertura do dossel, acúmulo de biomassa e água no solo, quando da realização de simulações considerando dados observados; incorporação da calculadora de evapotranspiração de referência (ET_o); novas condições iniciais para realizar a simulação; práticas de superfície de campo; eventos de irrigação de arroz inundado; e avaliação dos resultados de simulação usando indicadores estatísticos (FAO, 2015).

Inicialmente, o modelo foi calibrado e validado para a cultura do milho, em três localidades distintas na Espanha. Posteriormente, pesquisas vem sendo desenvolvidas fazendo uso do modelo (XIANGXIANG et al., 2013; VANUYTRECHT et al., 2014; BATTISTI et al., 2017; KLEMM & MCPHERSON, 2017); incluindo novas pesquisas com a cultura do milho distribuídas em diversos países, como Zimbábue (NYAKUDYA & STROOSNIJDER, 2014) e Nigéria (AKUMAGA et al., 2017), denotando a importância do desenvolvimento de pesquisas pontuais utilizando o modelo, de modo a subsidiar o incremento da literatura pertinente e ampliar o mapeamento das condições de crescimento e desenvolvimento da cultura do milho em diversos pontos do globo terrestre.

2.8. REFERÊNCIAS

AAMAAS, B.; PETERS, G. P. The climate impact of Norwegians' travel behavior. **Travel Behaviour and Society**, v. 6, n. 1, p. 10-18, 2017.

ABBAS, H. K.; SHIER, W. T.; PLASENCIA, J.; WEAVER, M. A.; BELLALLOUI, N.; KOTOWICZ, J. K.; BUTLER, A. M.; ACCINELLI, C.; TORRE-HERNANDEZ, M. E. de la; ZABLOTOWICZ, R. M. Mycotoxin contamination in corn smut (*Ustilago maydis*) galls in the field and in the commercial food products. **Food Control**, v. 71, n. 1, p. 57-63, 2017.

ABRAHA, M. GELFAND, I.; HAMILTON, S. K.; SHAO, C.; SU, Y. J.; ROBERTSON, G. P.; CHEN, J. Ecosystem Water-Use Efficiency of Annual Corn and Perennial

Grasslands: Contributions from Land-Use History and Species Composition. **Ecosystems**, v. 19, n. 6, p. 1001-1012, 2016.

ADDISCOTT, T. M.; WAGENET, R. J. Concepts of solute leaching in soils: A review of modeling approaches. **Journal Soil Science**, v. 36, p. 411-424, 1985.

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, n. 1, p. 225-234, 2017.

ANDRADE, E. M. de. A irrigação e suas implicações sobre o capital natural em regiões áridas e semi-áridas: uma revisão. **Ceres**, v. 56, n. 4, p. 390-398, 2009.

ANJOS, F. A. **Simulação de produtividade de milho em diferentes épocas de semeio em Arapiraca, Alagoas, pelo modelo AquaCrop**. 2011. 72 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia; Produção vegetal; Proteção de plantas) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2011.

ANONI, C. O. **Mapeamento associativo para múltiplos ambientes e múltiplos locais, visando tolerância à seca em milho**. 2016. 64 f. Tese (Doutorado Ciências). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

ANUÁRIO BRASILEIRO DO MILHO. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2011. 128 p. Disponível em: <http://www.grupogaz.com.br/tratadas/eo_edicao/20/2011/07/20110712_f08f28b93/pdf/2920_milho11_final.pdf>. Acesso em: 26 de outubro de 2016.

APIPATTANAVIS, S.; BERT, F.; PODESTÁ, G.; RAJAGOPALAN, B. Linking weather generators and crop models for assessment of climate forecast outcomes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 2, p. 166-174, 2010.

BAIGORRIA, G. A., JONES, J. W., O'BRIEN, J. J. Potential predictability of crop yield using an ensemble climate forecast by a regional circulation model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 8/9, p. 1353- 361, 2008.

BALKOVIC, J.; VAN DER VELDE, M.; SCHMID, E.; SKALSKÝ, R.; KHABAROV, N.; OBERSTEINER, M.; STÜRMER, B.; XIONG, W. Pan-European crop modelling

with EPIC: Implementation, up-scaling and regional crop yield validation. **Agricultural Systems**, v. 120, n. 1, p. 61-75, 2013.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 200, n. 1, p. 28-37, 2017.

BEN NOUNA, B.; KATERJI, N.; MASTRORILLI, M. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. Evaluation of model performance. **European Journal of Agronomy**, v. 13, n. 4, p. 309-322, 2000.

BENTON, T. G. Food Security. **Encyclopedia of Applied Plant Sciences**: Elsevier, v. 2, p. 19-22, 2017.

BLÜMLING, B.; YANG, H.; PAHL-WOSTL, C. Proposal for the integration of irrigation efficiency and agricultural water productivity. In: Lamaddalena, N., et al. (Eds.), **Water Use Efficiency and Water Productivity: WASAMED Project**. Options Méditerranéennes, Série B. Etudes et Recherches, n. 57, p. 263-280, 2007.

BOWMER, K. H.; MEYER, W. S. Irrigation agriculture: sustainability through holistic approaches to water use and innovation. In: Giannino, M. (Ed.), **Drinking Water and Water Management: New Research**. Nova Science Publishers Inc., New York, 2014. Cap. 7, p. 181-221.

BRITO, M. E. B.; ARAÚJO FILHO, G. D. de; WANDERLEY, J. A. C.; MELO, A. S. de; COSTA, F. B. da; FERREIRA, M. G. P. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 5, p. 1244-1254, 2013.

BUSSAY, A.; VAN DER VELDE, M.; FUMAGALLI, D.; SEGUINI, L. Improving operational maize yield forecasting in Hungary. **Agricultural Systems**, v. 141, n. 1, p. 94-106, 2015.

CANTELAUBE, P.; TERRES, J. M. Use of Seasonal Weather Forecasts in Crop Yield Modelling. **Tellus A**, v. 57, n. 3, p. 476-487, 2005.

CHAVES, M. M. Effects of water deficits on carbon assimilation. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 42, n. 234, p. 1-16, 1991.

CHILUNDO, M.; Joel, A.; Wesström, I.; Brito, R.; Messing, I. Response of maize root growth to irrigation and nitrogen management strategies in semi-arid loamy sandy soil. **Field Crops Research**, v. 200, n. 1, p. 143-162, 2017.

CHOI, H. S.; SCHNEIDER, U. A.; RASCHE, L.; CUI, J.; SCHMID, E.; HELD, H. Potential effects of perfect seasonal climate forecasting on agricultural markets, welfare and land use: A case study of Spain. **Agricultural Systems**, v. 133, n. 1, p. 177-189, 2015.

CHRISTOFIDIS, D. Água, irrigação e agropecuária sustentável. **Revista de Política Agrícola**, v. 22, n. 1, p. 115-127, 2013.

CIRILO, J. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CAMPOS, J. N. B. The Issue of Water in the Brazilian Semi-Arid Region. In: BICUDO, C. E. de M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. **Waters of Brazil**. Springer International Publishing. 2017. p. 59-71.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: Grãos**. Décimo segundo levantamento, setembro 2016. Brasília: CONAB, 2016. Disponível em: <
http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_09_09_15_18_32_boletim_12_setembro.pdf>. Acesso em: 20 de outubro de 2016.

COSTA, L. C. **Modelo agrometeorológico de previsão de produtividade da soja para as regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba**. 40p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal de Viçosa-UFV/MG. 1988.

COSTA, L. C.; BARROS, A. H. C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.1, p. 75-82, 2001.

D'ORGEVAL, T.; BOULANGER, J. P.; CAPALBO, M. J.; GUEVARA, E.; PENALBA, O.; MEIRA, S. Yield estimation and sowing date optimization based on seasonal climate information in the three CLARIS sites. **Climatic Change**, v. 98, n. 3, p. 565-580, 2010.

DAS, B.; SINGH, A.; PANDA, S. N.; YASUDA, H. Optimal land and water resources allocation policies for sustainable irrigated agriculture. **Land Use Policy**, v. 42, n. 1, p. 527-537, 2015.

DELGADO, A. R. S.; DUARTE, W. S.; LIMA, V. N.; CARVALHO, D. F. Modelagem matemática para otimização da produção e renda de melão e melancia em função de lâminas de água e doses de nitrogênio. **Irriga**, v. 15, n. 1, p. 1-9, 2010.

DENG, X. P.; SHAN, L.; ZHANG, H.; TURNER, N.C. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. **Agricultural Water Management**, v. 80, n. 2, p. 23-40, 2006.

DUMONT, B.; BASSO, B.; LEEMANS, V.; BODSON, B.; DESTAIN, J. P.; DESTAIN, M. F. A comparison of within-season yield prediction algorithms based on crop model behaviour analysis. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 204, n. 1, p. 10-21, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA MILHO E SORGO, **Sistema de Produção**, 1 ISSN 1679-012X Versão Eletrônica - 6ª edição Setembro de 2010. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/index.htm>. Acesso em: 26 de outubro de 2016.

ENGEL, V.L.; POGGIANI, F. Estudo da concentração de clorofila nas folhas e seu espectro de absorção de luz em função do sombreamento em mudas de quatro espécies florestais nativas. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 3, n. 1, p. 39-45, 1991.

FANCELLI, A. L. Cultivo racional e sustentável requer maior conhecimento sobre planta do milho. **Visão Agrícola**, v. 10, n. 13, p. 20-23, 2015.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. 4ª ed., Livrocerees Piracicaba, 2004, 360 p.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **AquaCrop Version 5.0 - New features and updates (October, 2015)**. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-bc087e.pdf>>. Acesso em: 23 out. 2016.

FAOSTAT. **Séries temporais e dados transversais relativas à alimentação e à agricultura para cerca de 200 países**. 2009. Disponível em: < <http://faostat.fao.org/default.aspx>>. Acesso em: 26 de outubro de 2016.

FARRÉ, I.; FACI, J. M. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. **Agricultural Water Management**, v. 83, n. 1/2, p. 135-143, 2006.

FARRÉ, I.; FACI, J. M. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 3, p. 383-394, 2009.

FLECK, N. G., BALBINOT JR., A. A.; AGOSTINETTO, D.; VIDAL, R. A. Característica de plantas de cultivares de arroz irrigado relacionados à habilidade competitivas com plantas concorrentes. **Planta Daninha**, v. 21, p. 97-104, 2003.

FRANCE, C.; THORNLEY, J. H. M. **Matematic models in agriculture. The quantitative approach to problems in agriculture and related sciences**. London: Butterworth, 1984.

FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M.; ZOCOLER, J. L. Funções de produção água-cultura. In: FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M.; ZOCOLER, J. L. (Ed.): **Planejamento de irrigação: análise e decisão de investimentos**. Brasília: EMBRAPA, p. 283-314, 2005.

GALLI, G. **Predição genômica de híbridos de milho para caracteres de arquitetura oligogênica e sob diferentes parâmetros de penalização e correção de fenótipo**. 2016. 71 f. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

GALON, L.; TIRONI, S.P.; ROCHA, A. A.; SOARES, E. R.; CONCENÇO, G.; ALBERTO, C. M. Influência dos fatores abióticos na produtividade da cultura do milho. **Revista Trópica-Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 4, n. 3, p. 28, 2010.

GARCIA, R. G.; DALLACORT, R.; KRAUSE, W.; SERIGATTO, E. M.; FARIA JÚNIOR, C. A. F. Calendário agrícola para a cultura do milho em Sinop (MT). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 2, p. 218-222, 2013.

HENG, L. K.; HSIAO, T. C.; EVETT, S.; HOWELL, T.; STEDUTO, P. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 488-498, 2009.

HSIAO, T.; STEDUTO, P.; FERERES, E. A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. **Irrigation Science**, v. 25, n. 3, 209-231, 2007.

IQBAL, M. A.; SHEN, Y.; STRICEVIC, R.; PEI, H.; SUN, H.; AMIRI, E.; PENAS, A.; DEL RIO, S. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. **Agricultural Water Management**, v. 135, n. 5, p. 61-72, 2014.

JONES, H. G. **Plant and Microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. 2.ed. Cambridge: University Press, Cambridge, 1992. 428 p.

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

KARAM, F.; BREIDY, J.; STEPHAN, C.; ROUPHAEL, J. Evapotranspiration, yield and water use efficiency of drip irrigated corn in the Bekaa Valley of Lebanon. **Agricultural Water Management**, v. 63, n. 2, p. 125-137, 2003.

KATERJI, N.; MASTRORILLI, M.; CHERNI, H. E. Effects of corn deficit irrigation and soil properties on water use efficiency. A 25-year analysis of a Mediterranean environment using the STICS model. **European Journal of Agronomy**, v. 32, n. 2, p. 177-185, 2010.

KATERJI, N.; MASTRORILLI, M.; RANA, G. Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: review and analysis. **European Journal of Agronomy**, v. 28, n. 4, p. 493-507, 2008.

KHAN, S.; HANJRA, M.A.; MU, J. Water management and crop production for food security in China: a review. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 3, p. 349-360, 2009.

KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R.; GASSMAN, P. W.; DEBAEKE, P. **A general, process-oriented model for two competing plant species**. Trans. ASAE 35, p. 801-810, 1992.

KLEMM, T.; MCPHERSON, R. A. The development of seasonal climate forecasting for agricultural producers. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, n. 1, p. 384-399, 2017.

KUNZ, J. H.; BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; HECKLER, B. M. M.; COMIRAN, F. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n. 11, p.1511-1520, 2007.

LANGNER, J. A.; STRECK, N. A.; DALMAGO, G. A.; REINIGER, L. R. S.; DURIGON, A.; SILVA, S. D. D.; LAGO, I.; SCHEFFEL, L. G.; POERSCH, A. H. Estimating the development of landrace and improved maize cultivars as a function of air temperature. **Ciência Rural**, v. 46, n. 10, p. 1737-1742, 2016.

LI, Z.; SUN, Z. Otimizado irrigação única pode alcançar o rendimento do milho alto e eficiência do uso da água no Corn Belt do nordeste da China. **European Journal of Agronomy**, v. 75, p. 12-24, 2016.

LIU, F.; STÜTZEL, H. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. **Scientia Horticulturae**, v.102, p.15-27, 2004.

MALVESTITI, G. S. **Resposta técnica e econômica para adubação com N, P e K em milho convencional e geneticamente modificado**. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, 2013.

MANFRON, P. A.; BACCHI, O. O. S.; DOURADO NETO, D.; PEREIRA, A. R.; MEDEIROS, S. L. P.; PILAU, F. G. Modelo da profundidade efetiva do sistema radicular

na cultura de milho em função de graus-dia acumulados. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 2, p. 327-332, 2003.

MARCHÃO, R. L., BRASIL, E. M.; XIMENES, P. A. Interceptação da radiação fotossinteticamente ativa e rendimento de grãos de milho adensado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 5, p. 170-181, 2006.

MARLETTO, V.; VENTURA, F.; FONTANA, G.; TOMEI, F. Wheat growth simulation and yield prediction with seasonal forecasts and a numerical model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 147, n. 1/2, p. 71-79, 2007.

MESSINA, C. D.; SINCLAIR, T. R.; HAMMER, G. L.; CURAN, D.; THOMPSON, J.; OLER, Z.; GHO, C.; COOPER, M. Limited-transpiration trait may increase maize drought tolerance in the US Corn Belt. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 1978-1986, 2015.

MINUZZI, R. B.; LOPES, F. Z. Desempenho agrônômico do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, p. 734-740, 2015.

MOLDEN, D.; OWEIS, T. Pathways for increasing water productivity. In: MOLDEN, D. (Ed.), **Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture**. International Water Management Institute, London, Earthscan and Colombo, 2007. Cap. 7, p. 279-310.

MOURA, E. G.; TEIXEIRA, A. P. R.; RIBEIRO, V. S.; AGUIAR, A. C. F.; FARIAS, M. F. Crescimento e produtividade da cultura do milho (*Zea mays*) submetido a vários intervalos de irrigação, na região da Pré-Amazônia. **Irriga**, v.11, n. 2, p. 169-177, 2006.

MURASHIKI, T. C.; CHIDEWE, C.; BENHURA, M. A.; MARINGE, D. T.; DEMBEDZA, M. P.; MANEMA, L. R.; MVUME, B. M.; NYANGA, L. K. Levels and daily intake estimates of aflatoxin B₁ and fumonisin B₁ in maize consumed by rural households in Shamva and Makoni districts of Zimbabwe. **Food Control**, v. 72, n. 2, p. 105-109, 2017.

MURGA-ORRILLO, H.; ARAUJO, W. F.; ABANTO-RODRIGUEZ, C. A.; BARDALES-LOZANO, R. M. B.; SAKAZAKI, R. T.; POLO-VARGAS, A. R. P.

Influência da cobertura morta na evapotranspiração, coeficiente de cultivo e eficiência de uso de água do milho cultivado em cerrado. **Irriga**, v. 21, n. 2, p. 352-364, 2016.

NYAKUDYA, I. W.; STROOSNIJDER, L. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: Modelling with AquaCrop. **Agricultural Water Management**, v. 146, n. 1, p. 280-296, 2014.

OLIVEIRA, L. A. M.; AZEREDO, R. A.; ARAÚJO, G. L.; MANTOVANI, E. C. Estimativa de produção em áreas irrigadas sob o cultivo da cultura do milho utilizando imagens de satélites. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 1, p. 400-409, 2016.

OLIVER, S. L.; RIBEIRO, H. Variabilidade climática e qualidade da água do Reservatório Guarapiranga. **Estudos Avançados**, v. 28, n. 82, p. 95-128, 2014.

PAREDES, P.; RIBEIRO, A.; PIRES, C. A. L.; PEREIRA, L. S. Usabilidade de previsões sazonais de ensemble da temperatura e precipitação na modelação da rega e da produção. Aplicação a cevada e milho. In: PIRES, C. A. L., PEREIRA, L. S. (Eds.), **Predictabilidade Sazonal de Secas. Avaliação ao nível Regional e Agrícola**. ISAPress, Lisboa, 2015. p. 307-332.

PARIZI, A. R. C.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; SOARES, F. C.; GOMES, A. C. DOS S. Funções de produção da cultura do milho submetido a diferentes lâminas de irrigação através de estudo simulado. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 3, 2016.

PASSIOURA, J. B. Simulation models: Science, snake oil, or engineering? **Agronomy Journal**, v. 88, p. 690-694, 1996.

PAULINO, J.; FOLEGATTI, M. V.; ZOLIN, C. A.; ROMÁN, R. M. S.; JOSÉ, J. V. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. **Irriga**, v. 16, n. 2, p. 163, 2011.

PAYERO, J. O.; MELVIN, S. R.; IRMAK, S.; TARKALSON, D. Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. **Agricultural Water Management**, v. 84, n. 1/2, p. 101-112, 2006.

PAYERO, J. O.; TARKALSON, D. D.; IRMAK, S.; DAVISON, D.; PETERSEN, J. L. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 8, p. 895-908, 2008.

PERAGÓN, J. M.; PÉREZ-LATORRE, F. J.; DELGADO, A. A GIS-based quality assessment model for olive tree irrigation water in southern Spain. **Agricultural Water Management**, v. 148, n. 1, p. 232-240, 2015.

PERGORARE, A. B.; FEDATTO, E.; PEREIRA, S. B.; SOUZA, L. C. F.; FIETZ, C. R. Irrigação suplementar no ciclo do milho “safrinha” sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 262-271, 2009.

PUPPALA, N.; FOWLER, J. L.; JONES, T. L.; GUTSCHICK, V.; MURRAY, L. Evapotranspiration, yield, and water-use efficiency responses of *Lesquerella fendleri* at different growth stages. **Industrial Crops and Products**, v. 21, n. 1, p.33-47, 2005.

RAES, D.; STEDUTO P.; HSIAO T. C.; FERERES E. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p.438-447, 2009.

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

ROSA, L. M.; DILLENBURG, L. R.; FORSETH, I. N. Responses of soybean leaf angle, photosynthesis and stomatal conductance to leaf and soil potential. **Annals of Botany**, London, v. 67, p. 51-58, 1991.

SANTOS, Á. de O. **Índices de tolerância e abordagem fatorial analítico no estudo do déficit hídrico em milho**. 2016. 116 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, 2016.

SCHAIBLE, G. D.; AILLERY, M. P. Challenges for US Irrigated Agriculture in the Face of Emerging Demands and Climate Change. In: SCHAIABLE, G. D.; AILLERY, M. P. **Competition for Water Resources**. Elsevier, 2017. Cap. 2, p. 44-79.

SCHITTENHELM, S. Effect of drought stress on yield and quality of maize/sunflower and maize/sorghum minter crops for biogas production. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 196, n. 4, p. 253-261, 2010.

SHALHEVET, J. Plants under salt and stress. In: FOWDEN, L.; MANSFIELD, T.; STODDART, J. **Plant adaptation to environmental stress**. London: Chapman & Hall, Cap. 7, p. 133-154, 1993.

SHAMIR, E.; MEGDAL, S. B.; CARRILLO, C.; CASTRO, C. L.; CHANG, H.; CHIEF, K.; CORKHILL, F. E.; EDEN, S.; GEORGAKAKOS, K. P.; NELSON, K. M.; PRIETTO, J. 2015. Climate change and water resources management in the Upper Santa Cruz River, Arizona. **Journal of Hydrology**, v. 521, n. 2. p. 18-33, 2015.

SILVA, W. C. M.; RICIERI, R. P.; SOUZA, J. L. de; RIBEIRO, A. Caracterização agroclimática da região de Cascavel - Paraná para o cultivo do milho. **Ceres**, v. 54, n. 313, p. 341-348, 2007.

SINGH, A. Hydrological problems of water resources in irrigated agriculture: a management perspective. **Journal of Hydrology**, v. 541, n. 10, p. 1430-1440, 2016.

SOUZA FILHO, A. L.; OLIVEIRA, F. H. T.; PRESTON, W.; SILVA, G. F; CARVALHO, S. L. Nitrogen and phosphate fertilizer on green corn grown in succession to the melon crop. **Horticultura Brasileira**, v. 34, n. 3, p. 392-397, 2016.

SOUZA, E. J.; Cunha, F. F.; Magalhães, F. F.; Silva, T. R. da; Santos, O. F. Eficiência do uso da água pelo milho doce em diferentes lâminas de irrigação e adubação nitrogenada em cobertura. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 4, p. 750, 2016.

SOUZA, L. S. B. de; MOURA, M. D. de; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. D. da. Eficiência do uso da água das culturas do milho e do feijão-caupi sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado no semiárido brasileiro. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 715-721, 2011.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v. 101, p.426-437, 2009.

STOCKLE, C. O.; DONATELLI, M.; NELSON, R. CropSyst, a cropping systems simulation model. **European Journal Agronomy**, v. 18, p. 289-307, 2003.

STRIEDER, M.L.; SILVA, P. R. da; RAMBO, L.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; ENDRIGO, P. C.; JANDREY, D. B. Características de dose e rendimento de milho em diferentes espaçamentos e sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 309-317, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p.

VALENZUELA, J. C. Agro-environmental evaluation of irrigation land: I. Water use in Bardenas irrigation district (Spain). **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 2, p. 179-187, 2009.

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, n. 1, p. 351-360, 2014.

VAUGHN, L.; BERNARDS, M.; ARKEBAUER, T.; LINDQUIST, J. L. Corn and velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) growth and transpiration efficiency under varying water supply. **Weed Science**, v. 64, n. 4, p. 596-604, 2016.

VAZIFEDOUST, M.; VAN DAM, J. C.; FEDDES, R. A.; FEIZI, M. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 2, p. 89-102, 2008.

VIAN, A. L.; SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; SIMON, D. H.; DAMIAN, J. M.; BREDEMEIER, C. Variabilidade espacial da produtividade de milho irrigado e sua correlação com variáveis explicativas de planta. **Ciência Rural**, v. 46, n. 3, p. 464-471, 2016.

VIEIRA, P.; JORGE, C.; COVAS, D. Assessment of household water use efficiency using performance indices. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 116, n. 1, p. 94-106, 2017.

VILELA, A. E.; RAVETTA, D. A. The effect of radiation on seedling growth and physiology in four species of *Proposis* L. (Mimosaceae). **Journal of Arid Environmental**, v. 44, p. 415-423, 2000.

WANG, W.; DING, Y.; SHAO, Q.; XU, J.; JIAO, X.; LUO, Y.; YU, Z. Bayesian multi-model projection of irrigation requirement and water use efficiency in three typical rice plantation region of China based on CMIP5. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, n. 1, p. 89-105, 2017.

WHISLER, F. D.; Acock, B.; Baker, D. N.; Fye, R. E.; Hodges, H. F.; Lambert, J. R.; Lemmon, H. E.; McKinion, J. M.; Reddy, V. R. Crop simulation models in agronomic systems. **Advances in Agronomy**, New York, v. 40, p. 141-208, 1986.

WILLIAMS, J. R.; JONES, C. A.; DYKE, P. T. **EPIC - Erosion/ productivity impact calculator. 1. The EPIC model**. USDA-ARS, Temple, TX, 1989.

WIT, C.T. Simulation of living systems. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H (ed.). **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen, Pudoc, p. 3-8, 1982.

XIANGXIANG, W.; QUANJIU, W.; JUN, F.; QIUPING, F. Evaluation of the AquaCrop model for simulating the impact of water deficits and different irrigation regimes on the biomass and yield of winter wheat grown on China's Loess Plateau. **Agricultural Water Management**, v. 129, n. 1, p. 95-104, 2013.

ZHANG, S.; SADRAS, V.; CHEN, X.; ZHANG, F. Water use efficiency of dryland maize in the Loess Plateau of China in response to crop management. **Field Crops Research**, v. 163, p. 55-63, 2014.

ZINYENGERE, N.; MHIZHA, T.; MASHONJOWA, E.; CHIPINDU, B.; GEERTS, S.; RAES, D. Using seasonal climate forecasts to improve maize production decision support in Zimbabwe. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 12, p. 1792-1799, 2011.

ZWART, S. J.; BASTIAANSEN, W. G. M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton, and maize. **Agricultural Water Management**, v. 69, p.115-133, 2004.

3. METODOLOGIA GERAL

3.1. Caracterização da área experimental

Foram realizados dois experimentos em duas épocas distintas, sendo a primeira época (E₁) conduzida no período compreendido entre os meses de abril e agosto de 2015 e a segunda época (E₂) entre agosto e dezembro do mesmo ano. A área experimental está localizada na Fazenda Tororó III, município de Pão de Açúcar, estado de Alagoas, nas coordenadas (09° 45' 20,7" S; 37° 25' 12,3' W e altitude de 18 m) (Figura 1). O clima local é classificado como BSh', com predomínio de caatinga hipoxerófila, conforme classificação de Köppen (1948). Apresenta temperatura média anual do ar de 27 °C e precipitação média anual de 500 mm (BARROS et al., 2012).

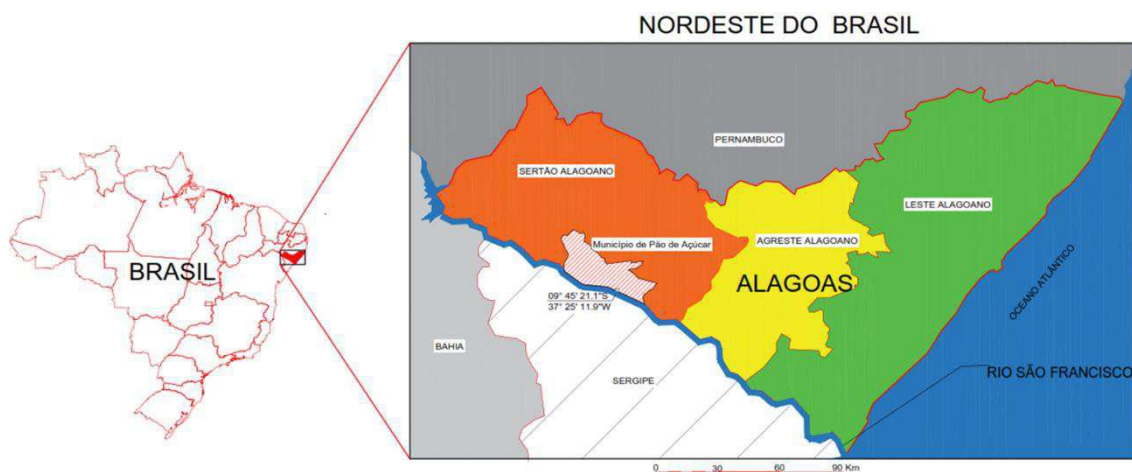


Figura 1. Localização da área experimental na Fazenda Tororó III, município de Pão de Açúcar, AL, 2015.

Durante as épocas de realização da pesquisa, foi feito monitoramento climático expresso por meio das variáveis agroclimáticas obtidas na estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia-INMET (09° 44' 56" S; 37° 25' 51' W e altitude de 15 m) localizada a 1,6 km da área experimental (Figura 2).



Figura 2. Estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia-INMET, Pão de Açúcar, AL, 2015.

Na área experimental, previamente à montagem do primeiro experimento, foram coletadas 12 amostras simples de solo nas camadas de 0,00-0,30 m e 0,30-0,60 m de profundidade, sendo obtidas amostras compostas representativas de cada profundidade. As amostras foram devidamente acondicionadas e enviadas ao Laboratório de Irrigação e Salinidade da Universidade Federal de Campina Grande para análise dos atributos físicos e químicos (Tabela 1).

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do solo da área experimental em Pão de Açúcar, AL, 2015.

Características	Profundidade do solo (cm)	
	0-30	30-60
Areia (%)	60,58	52,65
Silte (%)	26,50	42,61
Argila (%)	12,92	4,74
Textura do solo	Franco arenoso	Franco arenoso
CC (cm ³ cm ⁻³)	22,61	26,47
PMP (cm ³ cm ⁻³)	6,43	6,45
Densidade do solo (g cm ³)	1,39	1,41
Porosidade (%)	48,13	47,78
pH KCl (1:2,5)	6,54	5,95
Matéria orgânica (%)	1,07	0,93
P (ppm)	31	13
K (ppm)	76	43
Salinidade	Não salino	Não salino

3.2. Delineamento experimental

O delineamento estatístico aplicado foi em blocos casualizados com os tratamentos correspondentes a seis lâminas de irrigação (50, 75, 100, 125, 150 e 175% da ET₀) aplicadas nas duas épocas experimentais com quatro repetições.

3.3. Preparo da área

A área experimental total (480 m²) foi cultivada em Sistema de Plantio Direto, realizando-se dessecação da vegetação de cobertura com aplicação de 1 L ha⁻¹ (0,48 kg i.a. ha⁻¹) de Glifosato 15 dias antes da semeadura (Figura 3A). A adubação de fundação foi realizada a partir da interpretação da análise de solo, aplicando-se 45 kg ha⁻¹ de N₂, 138 kg ha⁻¹ P₂O₅ e 37 kg ha⁻¹ de K₂O (Figura 3B).



Figura 3. Sistema de Plantio Direto e área dessecada (A) e adubação de fundação (B), para a área do experimento em Pão Açúcar, AL, 2015.

Cada parcela experimental ocupou área de $20,0 \text{ m}^2$ ($5,0 \text{ m} \times 4,0 \text{ m}$), constituída de cinco linhas de irrigação de $5,0 \text{ m}$ de comprimento, em espaçamento de $0,80 \text{ m}$ entre linhas e $0,20 \text{ m}$ entre plantas. Por ocasião da colheita, uma fileira de cada extremidade da parcela (bordadura) foi descartada, colhendo-se área útil de 12 m^2 (Figura 4).

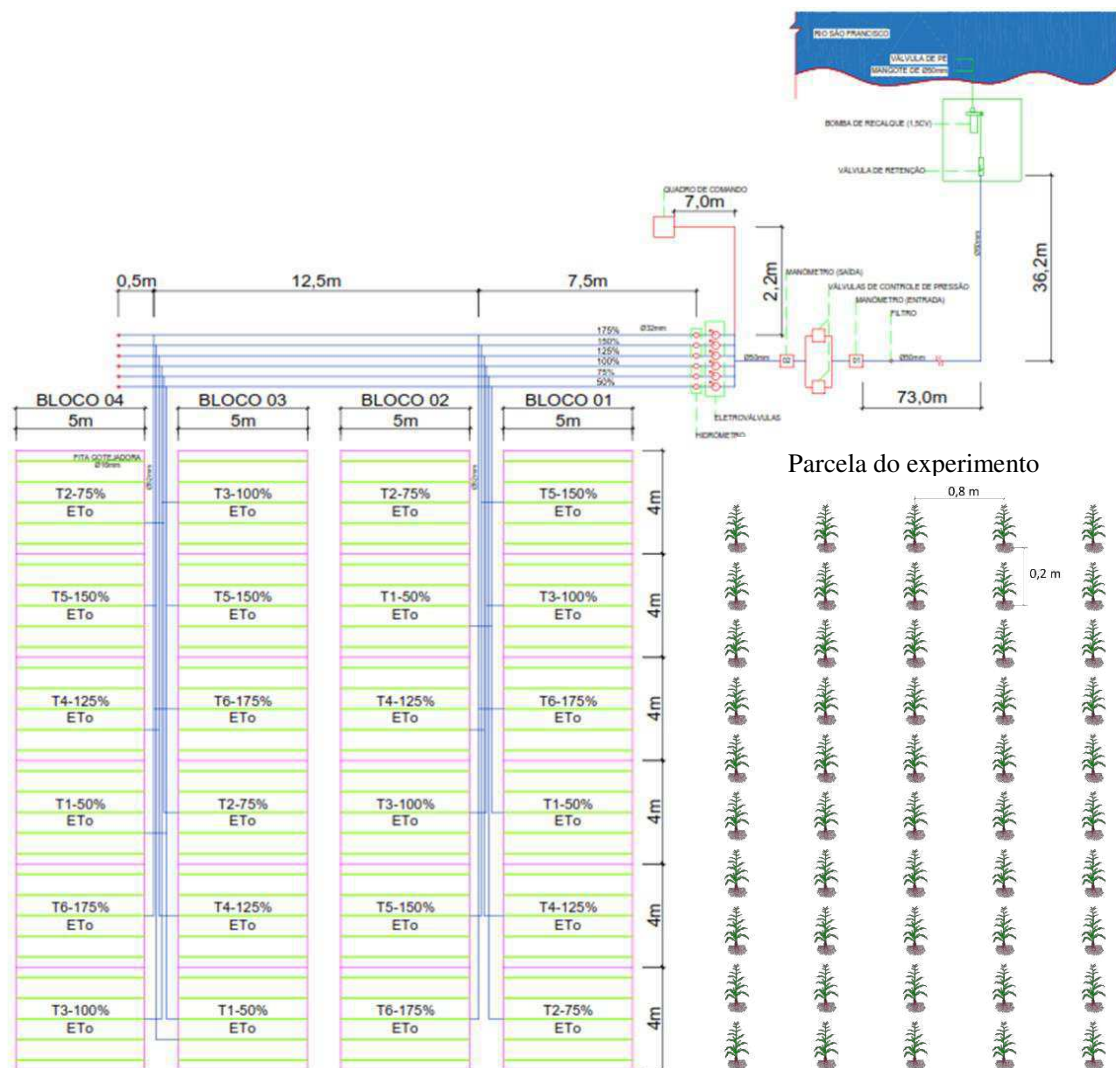


Figura 4. Croqui do experimento e parcela experimental.

Utilizou-se sistema de irrigação localizada por gotejamento, constituído de fita gotejadora de 16 mm de diâmetro nominal, com emissores de vazão $7,5 \text{ L h}^{-1}$ espaçados a cada 0,20 m, operando sob pressão de serviço de 10 metros de coluna de água (mca) (Figuras 5A e B). Para automação do sistema, adotou-se um conjunto de seis eletroválvulas acionadas a partir de um programador de seis estações (Figuras 5C e D).

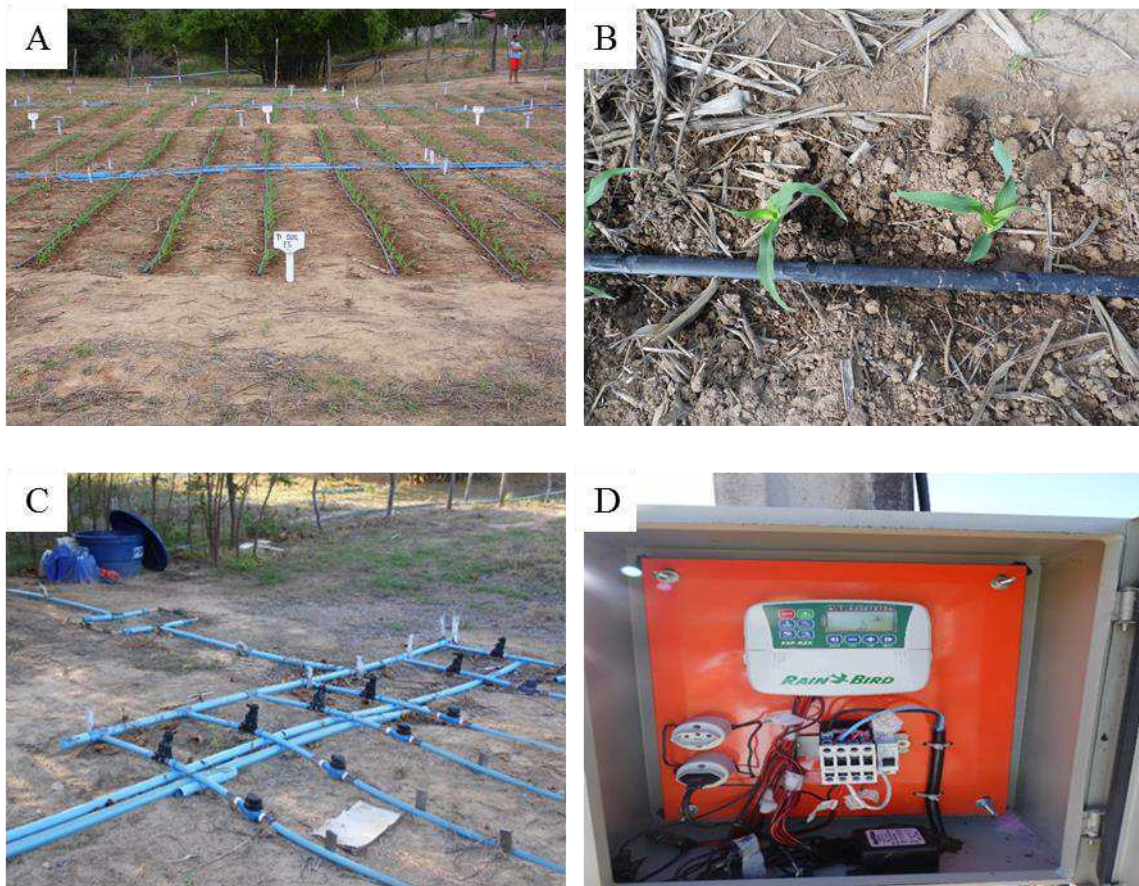


Figura 5. Sistema de irrigação localizada por gotejamento (A) com emissores espaçados a cada 0,20 m (B) e conjunto de seis eletroválvulas (C) acionadas por programador de seis estações (D) Pão de Açúcar, AL, 2015.

As medições de água no solo foram realizadas diariamente e registrado a média de umidade volumétrica a cada trinta minutos usando Reflectometria de Domínio de Tempo (TDR), (CS616, *Campbell Scientific*, Logan, Utah), ligado a um sistema de aquisição de dados CR1000 (Figura 6A). As hastes foram posicionadas verticalmente no solo, distantes 0,15 m das plantas e dentro das fileiras centrais, nas profundidades de 0,00-0,30 m e 0,30-0,60 m (Figura 6B), conforme metodologia recomendada por Rocha et al. (2014). Na E₁, foram utilizados 12 sensores distribuídos no bloco dois nos tratamentos correspondentes às lâminas L₁, L₂ e L₂ e bloco três nas lâminas L₃, L₅ e L₆. Para E₂, apenas nos tratamentos correspondentes a L₁ e L₃, foram registradas a umidade até o final do ciclo de 120 dias.

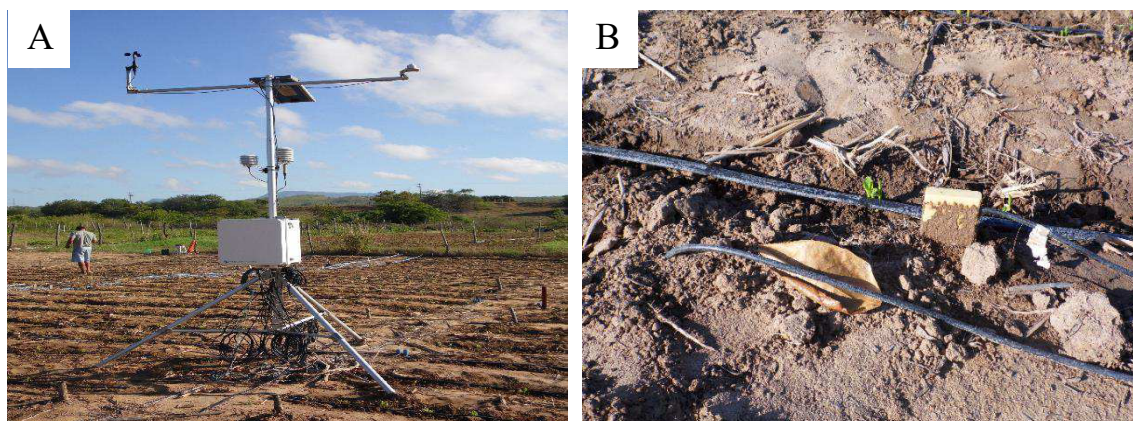


Figura 6. Sistema de aquisição de dados CR1000 (A) e hastes afixadas no solo nas profundidades de 0,00-0,30 e 0,30-0,60 m (B), Pão de Açúcar, AL, 2015.

3.4. Semeadura

A semeadura do milho, híbrido AG 7088 da Agrocere, para dois experimentos (E_1 =experimento 1, de 11/04/2015 a 11/08/2015 e E_2 =experimento 2, de 25/08/2015 a 25/12/2015), adotando-se três sementes distribuídas igualmente em cada cova (Figura 7A). Transcorridos 10 dias após a semeadura (DAS), foi realizado desbaste adotando-se uma planta por cova (Figura 7B), totalizando estande final de 62.500 plantas ha^{-1} .

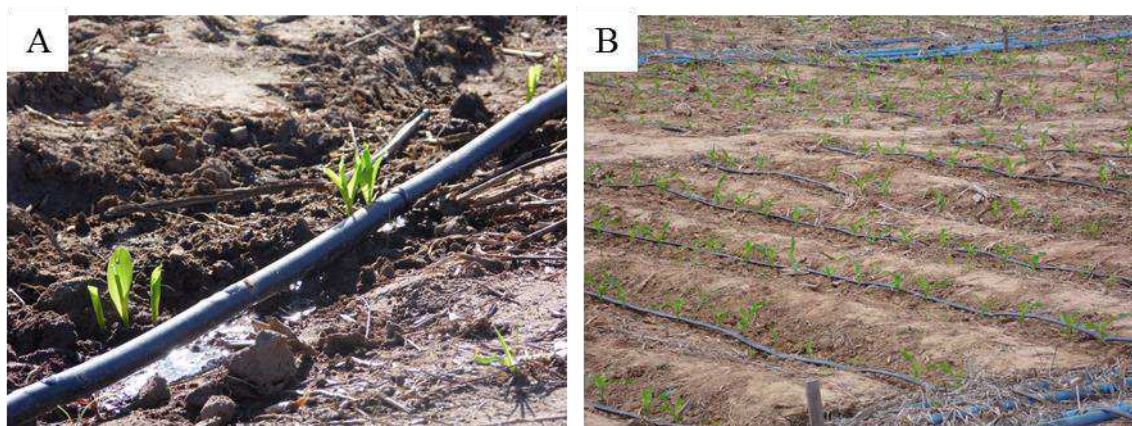


Figura 7. Três sementes distribuídas por cova (A) e desbaste 10 dias após a semeadura (B).

3.5. Aplicação dos tratamentos

A aplicação das lâminas de irrigação correspondentes aos tratamentos foi realizada com base na reposição da evapotranspiração de referência (ET_0), calculada através da soma da ET_0 de dois dias anteriores ao dia do evento de irrigação. Nos dias de registro de precipitação, durante o ciclo da cultura, a mesma foi subtraída da ET_0 . Os tempos necessários para reposição das respectivas lâminas foram gravados no programador a fim de acionar e interromper o funcionamento do sistema de irrigação. Aos 20 dias antecedentes a maturidade fisiológica as lâminas de irrigação foram suspensas para todos os tratamentos.

A água utilizada apresentou qualidade C1-S1, com baixa salinidade e reduzida concentração de sódio (Tabela 2), podendo ser usada para irrigação na maioria das culturas e quase todos os tipos de solos (RICHARDS, 1954).

Tabela 2. Atributos químicos da água de irrigação em Pão de Açúcar, AL, 2015.

Características Químicas	Unidade	Valor
pH	-	8,15
Condutividade elétrica	dS m ⁻¹	0,156
Cálcio	mmol _c L ⁻¹	0,438
Magnésio	"	0,162
Sódio	"	0,878
Potássio	"	0,033
Carbonatos	"	0,000
Bicarbonatos	"	0,320
Cloretos	"	0,886
Sulfatos	"	0,355
Ferro Total	ppm	0,078
*RAS	-	1,54
Classe da água		C1-S1
Classificação Geral		Sem restrições

*RAS, Razão de adsorção de sódio.

3.6. Manejo de Campo

Logo após o plantio, foi aplicado 4,0 L ha⁻¹ do herbicida seletivo pré-emergente Primestra Gold[®] (Syngenta Proteção de cultivos Ltda). A primeira adubação de cobertura ocorreu aos 22 DAP, utilizando-se 112 kg ha⁻¹ de ureia (45% de N₂). Aos 25 DAP, para controle da Lagarta do Cartucho (*Spodoptera frugiperda* L.), aplicou-se 150 mL ha⁻¹ do inseticida Karatê Zeon 50 CS[®] (Syngenta Proteção de cultivos Ltda). Completados 30 DAP foi aplicado 0,5 L por 100 L d'água do herbicida Roundup Original[®] (Monsanto do Brasil Ltda) para controle de ervas daninhas com jato dirigido nas entrelinhas de plantio. A segunda adubação de cobertura se deu aos 54 DAP, aplicando-se 112 kg ha⁻¹ de ureia (45% de N₂). Para E₁ e E₂, no período compreendido entre 35 e 45 DAP, alguns insetos como: marimbombos, mosca varejeira (*Dermatobia hominis*), serra pau (*Oncideres impluviata*) surgiram na área experimental e foram controlados com uma aplicação do inseticida Connect[®] (Bayer S/A) na dosagem de 750 mL ha⁻¹.

3.7. Variáveis de Crescimento

Foram realizados registros de campo mensalmente para diâmetro do colmo, comprimento e largura da folha +3, número de folhas verdes e secas. Para observação das raízes foram abertas seis trincheiras (1,0x1,0x1,30 m) na E₂ durante a maturidade fisiológica (Figura 8A). Ainda na E₂, quinzenalmente eram realizadas avaliações de massa seca pelo método destrutivo, separando folha, caule, pendão e espiga, acondicionando em saco de papel (Figura 8B) e colocadas para secar (Figura 8C) em estufa com ventilação forçada (Figura 8D) durante 72 horas a 65 °C no Centro de Ciências Agrárias, CECA, da Universidade Federal de Alagoas, UFAL, Rio Largo, AL, 2015.



Figura 8. Trincheiras (1,0x1,0x1,30 m) na E2 durante a maturidade fisiológica (A), avaliação de massa seca pelo método destrutivo (B) na área experimental e secagem de massa seca (C) em estufa de ventilação forçada (D) no CECA-UFAL, Rio Largo, AL, 2015.

O índice de área foliar (IAF) foi calculado a partir da relação entre a área foliar e o espaço ocupado pelas plantas por metro quadrado em cada tratamento (BEADLE, 1993). A cobertura do dossel é estimada com base no IAF através da equação de Ritchie (RITCHIE, 1972; RITCHIE et al., 1985; BELMANS et al., 1983) e aplicado por Farahani et al. (2009) Equação 1:

$$CD = 1 - \exp(-K \cdot IAF) \quad (1)$$

em que, CD (%) é a cobertura do dossel e K, coeficiente de extinção. O valor adotado para o coeficiente de extinção é de 0,61 (SARMENTO, 2015).

3.8. Variáveis de produção

Transcorridos 120 DAP, finalizando a maturidade, a área útil colhida manualmente por parcela correspondeu às três linhas do interior da parcela, sendo três metros da linha central e 1,5 m das linhas laterais, admitindo-se as duas linhas das extremidades como bordadura. Os componentes de produção de milho foram expressos por meio das variáveis: massa de mil grãos (MMG g 1000 grãos⁻¹), número de espigas por parcela (NEP un parcela⁻¹) (Figura 9A), rendimento de grãos secos (RGS kg ha⁻¹), comprimento de espiga (CES cm espiga⁻¹) (Figura 9B), diâmetro de espiga (DES mm espiga⁻¹) (Figura 9C), número de linhas por espiga (NLE un espiga⁻¹), número de grãos por linha (NGL un linha⁻¹) (Figura 9D), número de grãos por espiga (NGE un espiga⁻¹), massa de grãos por espiga (MGE g espiga⁻¹), massa de sabugo (MAS g sabugo⁻¹), massa de espiga despalhada (MED g espiga⁻¹) e massa de palhas (MPA g) de milho. Os valores da biomassa total e rendimento de grãos (13%) foram extrapolados e expressos em (kg ha⁻¹).

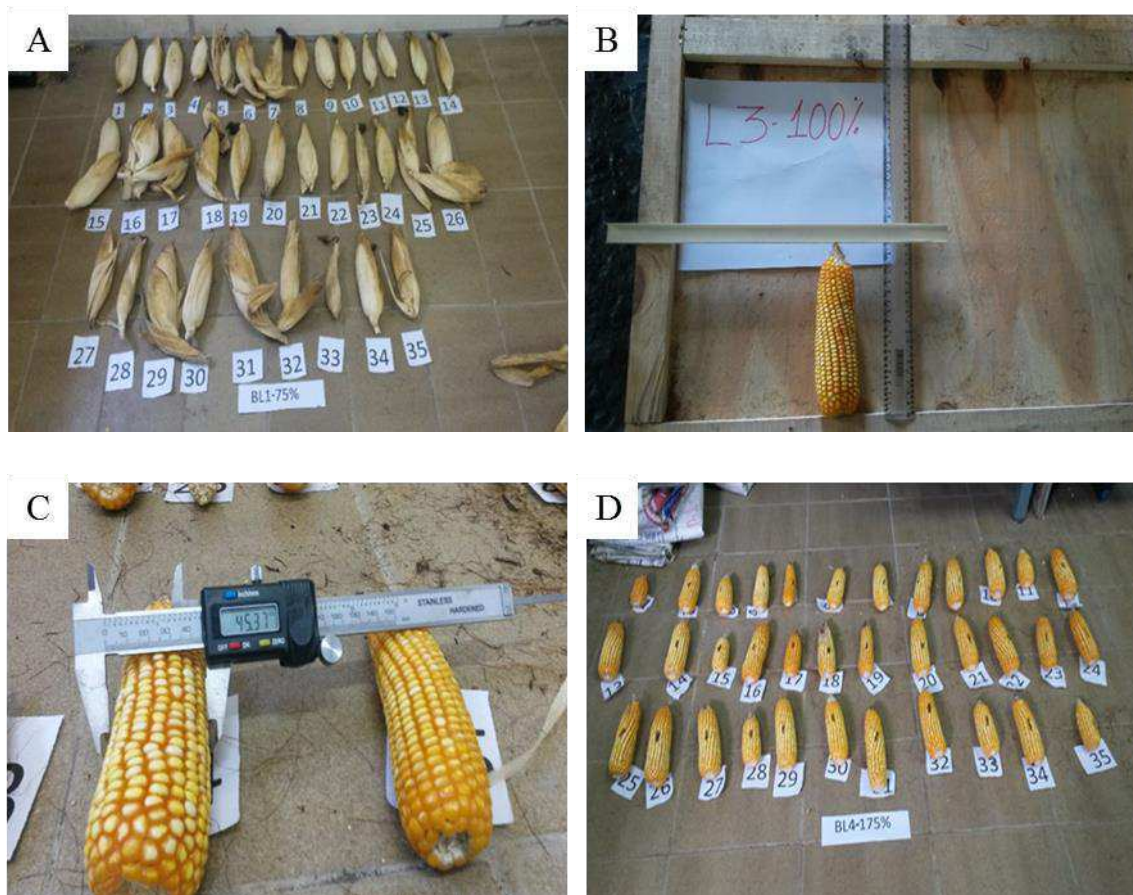


Figura 9. Número de espigas por parcela (A), comprimento de espiga (B), diâmetro de espiga (C) e número de grãos por linha (D), CECA-UFAL, Rio Largo, AL, 2015.

3.9. Calibração TDR (Reflectometria de Domínio de Tempo)

As amostras indeformadas de solo foram retiradas do local do experimento e acondicionadas em tubos de PVC (diâmetro: 100 mm); comprimento: 35 cm) nas profundidades de 0,00-0,30 m (Figura 10A) e 0,30-0,60 m (Figura 10B). No laboratório do CECA-UFAL foram colocadas para secagem em estufa de ventilação forçada durante 6 dias (144 h), após secagem total do material o mesmo foi destorroado e peneirado (Figura 10C). São retiradas duas amostras de solo com cilindros de PVC e adicionados 250 ml de água, de maneira que está umidade adicionada seja homogeneizada por toda amostra (Figura 10D). O tubo é preenchido e prensado com o solo, para inserção da haste e posterior anotação do pulso elétrico através do CR10 KD (*Campbell Science*) (Figura 10E). Retira-se três sub-amostras úmida deste material para pesagem (peso úmido) e

secagem em estufa a 105 °C durante 48 horas, pesagem e anotação do peso seco, em seguida, descarta-se o solo e pesagem das latas de alumínio (Figura F). A partir dos valores dos pulsos elétricos é gerada a equação de calibração utilizada para determinar a umidade do solo nos perfis analisados.

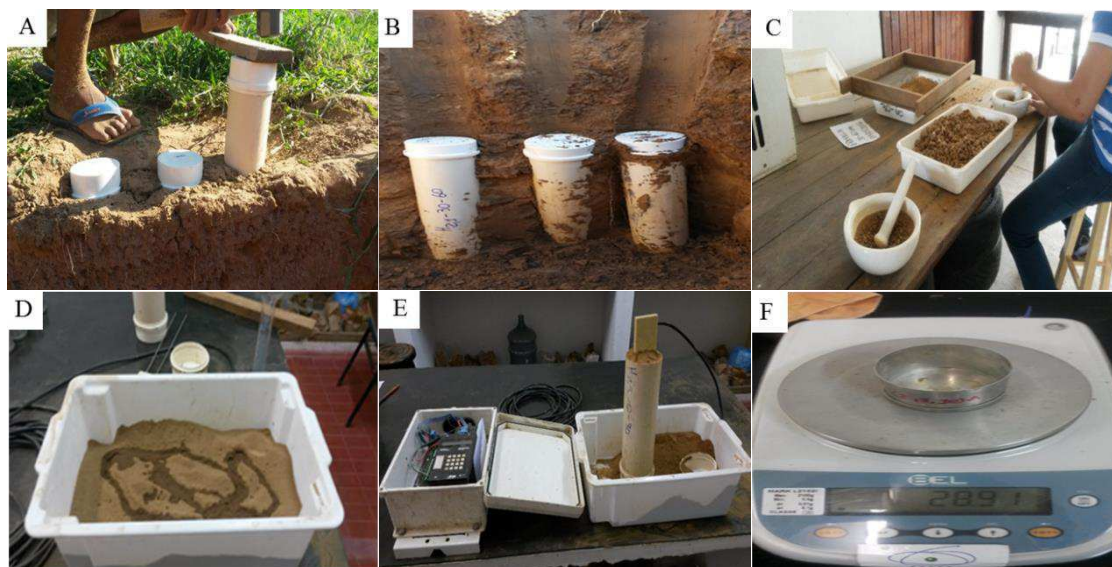


Figura 10. Amostras indeformadas de solo de 0,00-0,30 m (A) e 0,30-0,60 m (B), material destorroado e peneirado (C), adição de 250 ml de água às amostras de solo na bandeja (D), leitura do pulso elétrico no CR10 KD (*Campbell Science*) (E) e pesagem das latas de alumínio (F), CECA, UFAL, Rio Largo, AL, 2016.

3.10. Descrição do AquaCrop/FAO®

O modelo AquaCrop® versão 5.0 (Outubro, 2015) (Figura 11A), desenvolvido pela FAO, é um modelo conduzido pela água para uso como ferramenta de apoio à decisão no planejamento e análise de cenários climáticos futuros (STEDUTO et al., 2009 e HSIAO et al., 2009). O modelo AquaCrop® relaciona seus componentes solo-cultura-atmosfera através do solo e seu balanço hídrico (ARAYA et al., 2010). Para simulação, seis arquivos de entrada são utilizados: arquivo climático (temperatura mínima e máxima do ar, ET_0 , precipitação e CO_2), arquivo de cultura (tempo de emergência, cobertura máxima do dossel, início da senescência e maturidade), arquivo de irrigação e condições iniciais da água do solo. Os arquivos de entrada (Figura 11B) são criados no Software Microsoft Office 2016 (Bloco de Notas ou WordPad, versão: 1607). O modelo usa como

padrão dados de concentração média anual de CO₂ do Observatório Mauna Loa, no Havai, armazenados no subdiretório SIMUL.

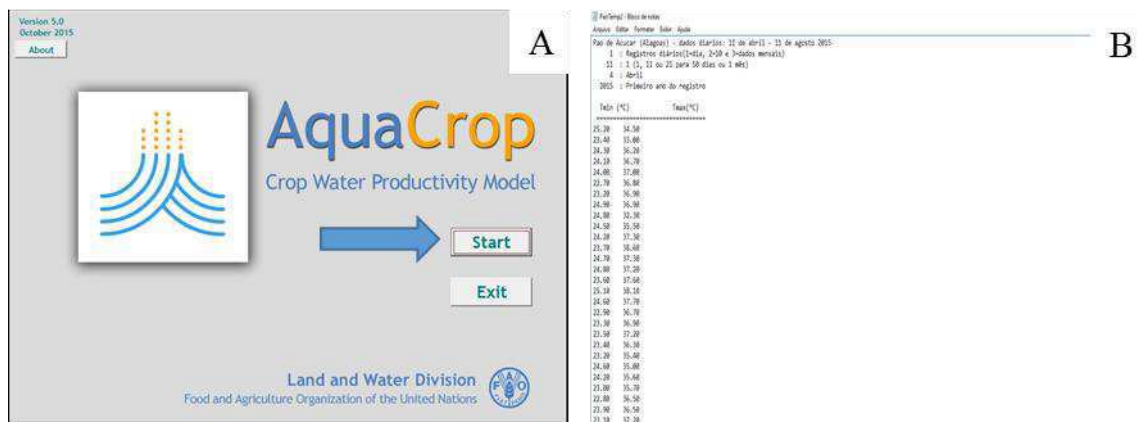


Figura 11. Interface do modelo AquaCrop[®] versão 5.0 (A) e arquivo de entrada (B) de temperatura mínima e máxima do ar (Bloco de Notas, versão: 1607) (STEDUTO et al., 2009).

O AquaCrop[®] utiliza cobertura do dossel (CD) em vez do índice de área foliar (IAF) como base para calcular a transpiração da cultura (Tr) e a evaporação do solo (E). A Tr está relacionada com a CD que é proporcional à extensão da cobertura do solo, enquanto que a evaporação é proporcional à área de solo descoberto (1-CD) (ARAYA et al., 2010). A CD é calculada a partir da transpiração diária, levando em consideração algumas características fisiológicas importantes da cultura, tais como: expansão foliar, desenvolvimento do dossel e senescência (STEDUTO et al., 2009 e ARAYA et al., 2010). A planta pode responder ao efeito do estresse hídrico com a senescência precoce da copa, fechamento dos estômatos e limitação da expansão do dossel expressos através de indicadores que variam de 0 (final da senescência) a 1 (início da senescência).

A produtividade normalizada da água da cultura (WP) é considerada constante para um determinado clima e cultura, podendo ser agrupada para as culturas C₃ entre 15 e 20 g m⁻² e 30 e 35 g m⁻² para C₄ (STEDUTO et al., 2009). O parâmetro WP no modelo é normalizado para tornar o modelo aplicável a diversos locais e estações, incluindo simulações climáticas futuras (STEDUTO et al., 2009 e HSIAO et al., 2009). O rendimento agrícola (Y) é calculado como o produto da biomassa (B) e do índice de colheita (IC). Este último é simulado por um aumento linear com o tempo, desde a floração até a maturação fisiológica (STEDUTO et al., 2009).

O AquaCrop[®] simula de forma combinada efeitos do estresse de fertilidade juntamente com estresse hídrico sendo considerada como uma das vantagens do modelo, podendo ser calibrado para situações de deficiência completa (0%) a ausência nutricional (100%). Pragas e doenças não são considerados, constituindo limitação ao modelo (AKUMAGA et al., 2017).

3.11. Calibração do modelo

O AquaCrop[®] foi calibrado para o híbrido AG 7088 no Semiárido Alagoano para o ano de 2015 utilizando dados experimentais da primeira época de plantio (E_1), devido a maior responsividade de produção (biomassa acumulada e rendimento de grão). Os resultados simulados de armazenamento de água no solo, cobertura do dossel e rendimento de biomassa e grãos foram comparados com os resultados observados para cada tratamento aplicado para as duas épocas de plantio, respectivamente. A diferença entre os resultados simulados e observados foram minimizados usando o método de tentativa e erro, no qual uma variável de entrada específica foi escolhida como a variável de referência e ajustando apenas aqueles parâmetros que eram conhecidos por influenciar no resultado da referida variável. O procedimento é repetido para chegar à correspondência mais próxima entre o modelo simulado e o valor observado para cada combinação de tratamento.

3.12. Parâmetros da cultura

O arquivo de cultura no AquaCrop[®] apresentam parâmetros específicos da cultura pertencentes a 13 estádios de crescimento fenológico com desenvolvimento de copa, raízes, evapotranspiração, água, fertilidade e temperatura (STEDUTO et al., 2009). A partir do Menu principal (Main menu) o usuário tem acesso à base de dados onde os arquivos estão armazenados e sub-divididos no macroambiente cultura e meio ambiente (clima, cultura, irrigação, campo, perfil do solo e lençol freático) e macroambiente simulação (período de simulação, condições iniciais, fora da estação e projetos) (Figura 12).

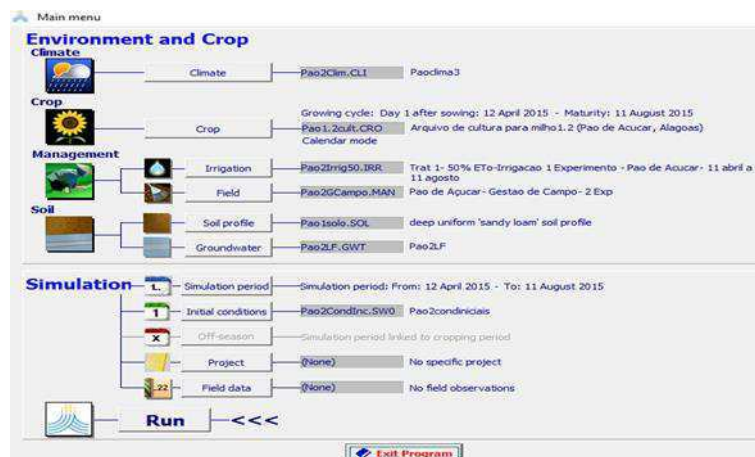


Figura 12. Menu principal do AquaCrop sub-dividido no macroambiente- cultura e meio ambiente e macroambiente simulação (STEDUTO et al., 2009).

Os valores de calibração para o desenvolvimento da cobertura do dossel do híbrido AG 7088 foram determinados por seis parâmetros e caracterizados pelo coeficiente de crescimento do dossel ($CCD-17,4\% \text{ dia}^{-1}$), que controla a taxa na qual o dossel se expande, coeficiente de declínio do dossel ($CDD-12,8\% \text{ dia}^{-1}$), que controla a velocidade com que o dossel senesce no final da estação de crescimento, cobertura máxima do dossel ($CD_x-96\%$), 5 dias para emergência, 110 dias até senescência e 122 dias até a maturidade final. Comparou-se a biomassa e o rendimento de grãos com os dados medidos utilizando a produtividade normalizada da água (WP) e o índice de colheita (IC) (Figura 13).

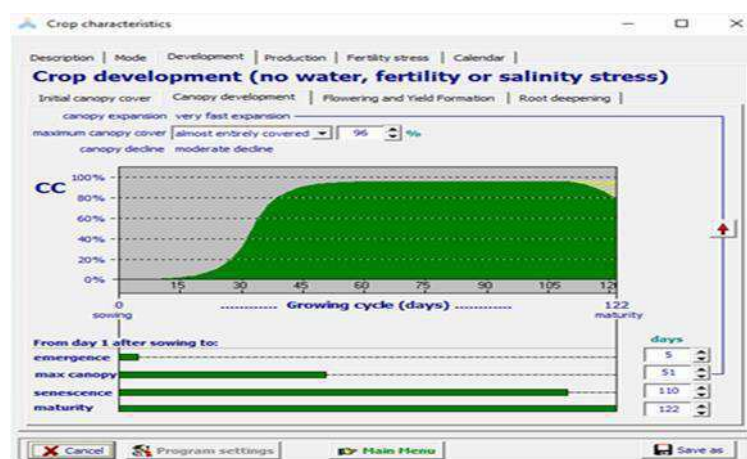


Figura 13. Interface do usuário para valores de calibração para o desenvolvimento da cobertura do dossel do híbrido AG 7088 (STEDUTO et al., 2009).

O período de crescimento reprodutivo consiste nos estádios de floração, formação de rendimento e índice de colheita (IC). Estes são controlados por dias para floração (70 DAP), período de floração (10 dias) e dias para início da colheita (42 dias). O estágio de floração foi desencadeado para começar quando a cultura atinge a cobertura máxima do dossel. O início da floração inicia na metade do estágio da CD_x , quando o mesmo é atingido, após o qual cessa a expansão do dossel (Figura 14).

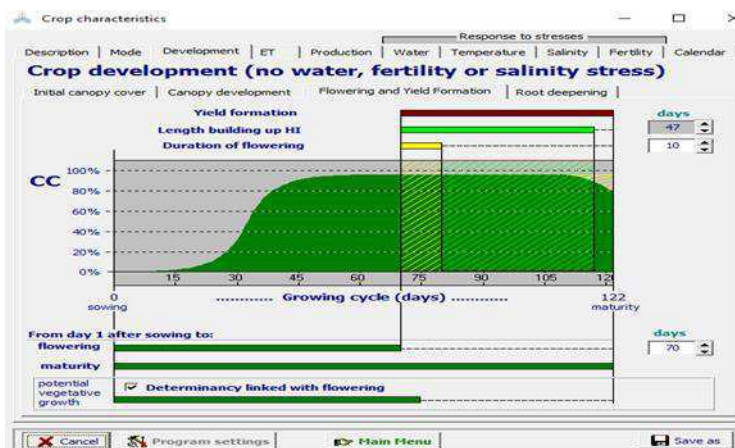


Figura 14. Período de crescimento reprodutivo e estádios de floração (STEDUTO et al., 2009).

A profundidade efetiva do sistema radicular foi estabelecida em 0,6 m com profundidade máxima obtida durante o período de floração. O coeficiente máximo de transpiração (K_{cb_x}) foi calibrado para padronizar ET_0 durante a estação de crescimento, onde o CD era igual à cobertura máxima do dossel (CD_x). O valor de K_{cb_x} assim obtido foi de 1,05 sob irrigação total e sem estresse de nutrientes. O valor calibrado da WP foi obtido como $32,1 \text{ g m}^{-2}$. O estresse hídrico para expansão do dossel fora calibrado para limite superior, limite inferior e fator forma em 0,14, 0,72 e 2,9, respectivamente. Além disso, para o estresse estomático, o limite superior e o fator forma foram 0,69 e 6,0, respectivamente, enquanto o limite inferior foi fixado no ponto de murcha permanente (PMP) (Figura 15).

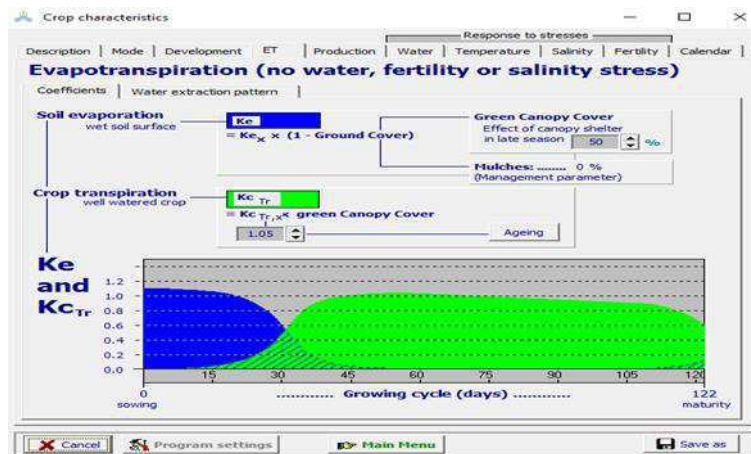


Figura 15. Coeficiente máximo de transpiração (K_{cb_x}) e estresse hídrico para expansão do dossel, híbrido AG 7088, Pão de Açúcar, AL, 2015 (STEDUTO et al., 2009).

Todavia, para o estresse promovendo a senescência precoce, o limite superior e o fator forma foram 0,69 e 2,7, respectivamente, enquanto o limite inferior foi fixado no PMP. Todos esses oito coeficientes calibrados foram relacionados à função de estresse hídrico da cultura no modelo AquaCrop[®], que foi utilizado para simular o rendimento dos diferentes tratamentos aplicados no experimento.

3.13. Manejo da irrigação

O modelo AquaCrop[®] disponibiliza opções específicas para que o usuário simule a irrigação, como determinar a necessidade de irrigação líquida, a geração de cronograma de irrigação baseado em estratégias de manejo irrigado ou sequeiro. A opção para programação de irrigação, fornece diferentes alternativas para os diversos métodos de aplicação como: irrigação por aspersão, irrigação superficial (bacia, sulco e inundação) e irrigação por gotejamento. A principal diferença entre os métodos de aplicação é a porção da superfície molhada durante a irrigação. No presente estudo, o experimento foi conduzido com irrigação por gotejamento com área molhada de 30%. Um cronograma de irrigação foi introduzido diretamente no modelo especificando quando (número de dias), profundidade (lâmina aplicada, mm) e qualidade da água ($dS\ m^{-1}$) (Figura 16).

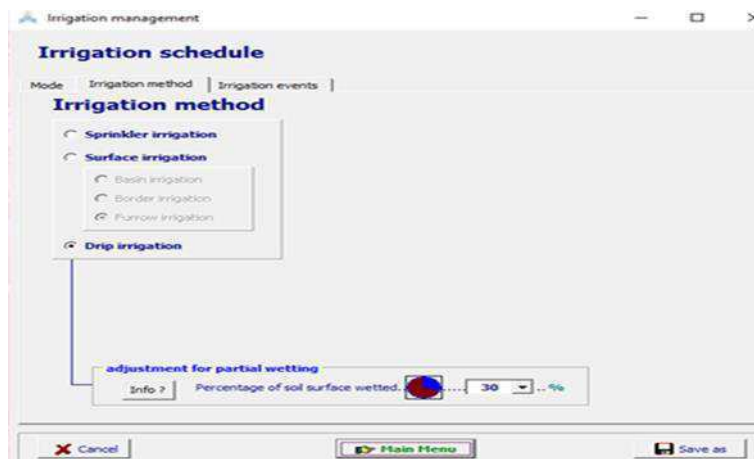


Figura 16. Irrigação por gotejamento com área molhada de 30% para Pão de Açúcar, AL, 2015 (STEDUTO et al., 2009).

3.14. Manejo de campo

Para os arquivos de manejo de campo como fertilidade do solo, resíduos de colheita e práticas de superfície, estes parâmetros não foram considerados, uma vez que estas práticas foram desativadas para calibração do modelo. As características do perfil do solo para dois horizontes (0,00-0,30 e 0,30-0,60 m), com classificação textural franco-arenosa, para ambos os horizontes. O PMP nas profundidades 0,00-0,30 e 0,30-0,60 m corresponderam a 6,4 e 6,5%, respectivamente. Enquanto que capacidade de campo (CC) para as camadas de 0,00-0,30 e 0,30-0,60 m, foram 22,6 e 26,5%. A saturação do solo (Sat.), capacidade de água disponível (CAD), condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e coeficiente de saturação (τ) de 0,00-0,30 m foram 48,1%, 162 mm m^{-1} , 883,9 mm dia^{-1} , 0,93. E as mesmas variáveis de 0,30-0,60 m foram 47,8%, 200 mm m^{-1} , 1481,3 mm dia^{-1} , 1,00. O escoamento superficial com curva número de 65 e água facilmente evaporável de 9,0 mm na camada superficial de 0,04 m. Não foi considerada a camada restritiva para impedimento do desenvolvimento radicular e presença de lençol freático (Figura 17).



Figura 17. Características do perfil do solo para dois horizontes (0,00-0,30 e 0,30-0,60 m) classificação textural, para Pão de Açúcar, AL, 2015 (STEDUTO et al., 2009).

4. CAPÍTULO 1

4.1. Componentes de produção e eficiência de uso da água pelo milho sob irrigação no semiárido Alagoano

Resumo

Objetivou-se analisar os componentes de produção e a eficiência de uso da água pelo milho cultivado com lâminas de irrigação, além de verificar se o emprego de análise multivariada é eficiente para evidenciar informações relevantes para este estudo. Foram realizados dois experimentos em duas épocas experimentais distintas, entre os meses de abril a dezembro de 2015, em delineamento de blocos ao acaso com seis lâminas de irrigação e quatro repetições. Os componentes de produção e a eficiência no uso da água do milho híbrido AG 7088 não foram influenciados pela variação de lâminas de irrigação na primeira época experimental. Na segunda época, o aumento das lâminas promoveu ganhos na massa de mil grãos, rendimento de grãos secos, número de grãos por linha, número de grãos por espiga, massa de sabugo e massa de espiga despalhada, reduzindo a eficiência do uso da água. O emprego de análise multivariada foi eficiente para reduzir o espaço multidimensional do conjunto de variáveis em três dimensões com informações relevantes para evidenciar diferenças entre lâminas de irrigação e épocas experimentais.

Palavras-chave: *Zea mays* L., produtividade, manejo de água, componentes principais.

4.1.1. Introdução

Dentre as espécies cultivadas, o milho (*Zea mays* L.) figura no cenário mundial como cultura de destaque, notadamente em virtude de sua multiplicidade de utilização, desde a alimentação humana e animal até a indústria de alta tecnologia e utilização na produção de biocombustíveis, evidenciando o milho como cultura de expressiva importância econômica para o agronegócio mundial (RIBEIRO et al., 2015).

O milho é cultivado em praticamente todo o território nacional, o que se justifica pelo seu elevado potencial produtivo (SILVA et al., 2015; LI & SUN, 2016). De fato, a cultura é muito eficiente na utilização dos fatores de produção, mesmo em ambientes restritivos, sendo tal eficiência atrelada ao seu aparato fotossintético. A cultura pertence ao grupo de plantas com metabolismo fotossintético do tipo C₄, o que lhe confere elevada

capacidade de captação e assimilação de dióxido de carbono (DANTAS JÚNIOR et al., 2011).

Silva et al. (2015) reportam que a disponibilidade hídrica no Nordeste brasileiro é um fator limitante para a produção agrícola, devido aos baixos índices pluviométricos proeminentes da Região, cenário caracterizado pela irregularidade na distribuição temporal e espacial das chuvas. Nessas condições, deve-se ressaltar que o déficit hídrico é um dos fatores responsáveis pelas baixas produtividades das culturas em regiões semiáridas, merecendo destaque no que tange ao desenvolvimento de estratégias promissoras para mitigar seu efeito negativo (ALDERFASI et al., 2016; WU et al., 2017).

A escolha de híbridos adaptados às condições edafoclimáticas dos ambientes de cultivo consiste em estratégia importante para a garantia de colheitas expressivas. Esta informação é fundamentada no fato de que a cultura do milho é caracterizada por exigir alta demanda hídrica e também por ser uma das mais eficientes no uso da água, ou seja, tem uma alta relação de produção de matéria seca por unidade de água absorvida (SILVA et al., 2012).

A disponibilidade de água em condições favoráveis à manutenção da umidade do solo em nível ideal para a cultura garante o crescimento e desenvolvimento pleno (XAVIER et al., 2014). Nesta conjuntura, o uso de lâminas de irrigação localizada vem sendo muito empregado para suprimento da demanda hídrica do milho, visando o uso racional da água e evidenciando sistemas de produção que envolvam aspectos econômicos, ambientais e sociais, que busquem formas de manejo que possibilitem a conservação dos recursos naturais, principalmente o recurso água (SILVA et al., 2015).

Em geral, as diferenças entre populações ou entre amostras são dependentes de um conjunto de variáveis e não apenas de uma. A utilização de uma única variável pode levar a resultados com baixa relevância para explicação de fenômenos complexos. De fato, existem situações em que a análise de variáveis de forma individual não evidencia diferenças entre tratamentos, enquanto que a análise global multivariada torna as diferenças evidentes, denotando a necessidade de se respeitar a estrutura de interdependência de variáveis e realizar análise multivariada sempre que possível (HAIR et al., 2009). Salienta-se que a Análise de Componentes Principais (ACP) é eficiente para reduzir altas dimensões do espaço de dados em espaço com dimensões menores (RANAMUKHAARACHCHI et al., 2017; Yi et al., 2017).

Com base no exposto, objetivou-se com este trabalho analisar os componentes de produção e a eficiência de uso da água para o milho em resposta à aplicação de lâminas de irrigação, além de verificar se o emprego de análise multivariada de dados é eficiente para evidenciar diferenças a partir da redução das dimensões originais dos dados em dimensões com informações relevantes para este estudo.

4.1.2. Material e Métodos

4.1.2.1. Caracterização da área experimental

Foram realizados dois experimentos com a cultura do milho em duas épocas distintas, sendo a primeira época (E_1) conduzida no período compreendido entre os meses de abril e agosto de 2015 e a segunda época (E_2) entre agosto e dezembro do mesmo ano. A área experimental está localizada no município de Pão de Açúcar, AL, ($09^\circ 45' 20,7''$ S, $37^\circ 25' 12,3'$ W) e altitude de 18 m. O clima local é classificado como BSh', com predomínio de caatinga hipoxerófila, conforme classificação de Köppen (1948). Apresenta temperatura média anual do ar de 27°C e precipitação média anual de 500 mm (BARROS et al., 2012).

Durante as épocas de realização da pesquisa foi feito monitoramento meteorológico por meio das variáveis temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, irradiação solar global e precipitação obtidas na estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia-INMET (latitude: $09^\circ 44' 56''$ S, longitude: $37^\circ 25' 51'$ W e altitude de 15 m) localizada a 1,6 km da área experimental, com valores mensais apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Variáveis meteorológicas obtidas durante os períodos de execução do experimento em Pão de Açúcar, AL, 2015.

Meses	Temperatura (°C)			Umidade Relativa do ar (%)			Radiação (MJ m ⁻²)			Precip.	Evapotr.
	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Rg	PAR	Rn	PP (mm)	ET ₀ (mm)
Abril	30,30	36,52	24,08	59,10	87,55	30,65	21,95	9,22	12,56	4,60	5,80
Mai	28,87	34,63	23,11	62,95	90,52	35,39	18,58	7,80	10,63	25,80	4,93
Junho	26,13	30,49	21,77	74,18	96,17	52,20	15,12	6,35	8,72	108,40	3,38
Julho	25,20	29,36	21,03	76,60	97,84	55,35	16,11	6,77	9,22	92,20	3,28
Agosto	26,16	33,44	18,89	63,93	96,57	31,29	21,80	9,15	12,47	0,00	5,20
Setembro	27,38	34,18	20,59	62,72	93,90	31,53	22,38	9,40	12,80	22,60	5,60
Outubro	28,56	35,40	21,73	58,98	88,61	29,35	23,93	10,05	13,69	10,00	6,19
Novembro	30,50	38,08	22,91	52,82	83,57	22,07	26,53	11,14	15,17	0,20	7,06
Dezembro	30,48	37,24	23,73	55,82	85,40	26,24	24,56	10,32	14,06	18,00	6,61

Precip.: precipitação, Evapotr.: evapotranspiração, Rg: radiação global, PAR: radiação fotossinteticamente ativa, Rn: balanço de radiação e PP: precipitação, ET₀: evapotranspiração de referência.

Na área experimental, previamente à montagem do primeiro experimento, foram coletadas 12 amostras simples de solo nas camadas de 0,00-0,30 m e 0,30-0,60 m de profundidade, sendo obtidas amostras compostas representativas de cada profundidade. As amostras foram devidamente acondicionadas e enviadas ao Laboratório de Irrigação e Salinidade da Universidade Federal de Campina Grande para análise dos atributos físicos e químicos (Tabela 2).

Tabela 2. Atributos físicos e químicos do solo da área experimental em Pão de Açúcar, AL, 2015.

Camadas	Atributos			
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Textura
0,00-0,30 m	60,58	26,50	12,92	FA ¹
0,30-0,60 m	52,65	42,61	4,74	FA ¹
	CC (%)	PMP (%)	Densidade (g cm ⁻³)	Porosidade (%)
0,00-0,30 m	22,61	6,43	1,39	48,13
0,30-0,60 m	26,47	6,45	1,41	47,78
	pH KCl (1:2,5)	M.O. (%)	P (ppm)	K (ppm)
0,00-0,30 m	6,54	1,07	31,00	76,00
0,30-0,60 m	5,95	0,93	13,00	43,00

¹: Franco Arenoso.

A água utilizada nos experimentos foi proveniente da calha do Rio São Francisco, distante 113 m da área experimental. Foi coletada amostra de 1 L de água no entorno do ponto de captação, acondicionando-a em vasilhame de água lavada três vezes com a própria água coletada e posteriormente encaminhada ao Laboratório Central Analítica em

Maceió, AL, para realização de análises químicas e de salinidade, sendo registrados os seguintes valores: pH=8,15, Ca=0,44 mmol_c L⁻¹, Mg=0,16 mmol_c L⁻¹, Na=0,88 mmol_c L⁻¹, K=0,03 mmol_c L⁻¹, Fe=0,08 ppm, Condutividade Elétrica=0,16 dS m⁻¹, Carbonatos=0,00 mmol_c L⁻¹, Bicarbonatos=0,32 mmol_c L⁻¹, Cloretos=0,89 mmol_c L⁻¹, Sulfatos=0,35 mmol_c L⁻¹, Razão de Adsorção de Sódio=1,54, Classe=C1-S1, Classificação Geral= Sem Restrição.

4.1.2.2. Delineamento experimental

O delineamento estatístico utilizado foi em blocos casualizados com os tratamentos correspondentes a seis lâminas de irrigação (50%, 75%, 100%, 125%, 150% e 175% da ET₀) aplicadas nas duas épocas experimentais com quatro repetições.

4.1.2.3. Preparo da área

A área experimental total (480 m²) foi cultivada em Sistema de Plantio Direto, realizando-se dessecação da vegetação de cobertura com aplicação de 1 L ha⁻¹ (0,48 kg i.a. ha⁻¹) de Glifosato 15 dias antes da semeadura. Cada parcela experimental ocupou área de 20,0 m² (5,0 m x 4,0 m), constituída de cinco linhas de irrigação de 5,0 m de comprimento, em espaçamento de 0,80 m entre linhas e 0,20 m entre plantas. Por ocasião da colheita, uma fileira de cada extremidade da parcela (bordadura) foi descartada, colhendo-se área útil de 12 m².

Utilizou-se sistema de irrigação localizada por gotejamento, constituído de fita gotejadora de 16 mm de diâmetro nominal, com emissores de vazão 7,5 L h⁻¹ espaçados a cada 0,20 m, operando sob pressão de serviço de 10 mca. Para automação do sistema, adotou-se um conjunto de seis eletroválvulas acionadas a partir de um programador de seis estações.

4.1.2.4. Semeadura

A semeadura do milho, híbrido AG 7088 da Agrocerec, nos dois experimentos (E₁=experimento 1, de 11/04/2015 a 11/08/2015 e E₂=experimento 2, de 25/08/2015 a 25/12/2015), adotando-se três sementes distribuídas igualmente em cada cova. Transcorridos 10 dias após a semeadura (DAS), foi realizado desbaste adotando-se uma planta por cova, totalizando estande final de 62.500 plantas ha⁻¹. Durante 15 DAS, o solo

foi mantido sob irrigação diária com 12,5 mm, considerando este tempo suficiente para o estabelecimento de plântulas no campo.

4.1.2.5. Aplicação dos tratamentos

A aplicação das lâminas de irrigação correspondentes aos tratamentos foi realizada com base na reposição da água evapotranspirada (ET_0), calculada através da soma da ET_0 de dois dias anteriores ao dia do evento de irrigação. Nos dias de registro de precipitação, durante o ciclo da cultura, a mesma foi subtraída da ET_0 . Os tempos necessários para reposição das respectivas lâminas foram gravados no programador a fim de acionar e interromper o funcionamento do sistema de irrigação.

4.1.2.6. Gestão de campo

Logo após o plantio, foi aplicado $4,0 \text{ L ha}^{-1}$ do herbicida seletivo pré-emergente Primestra Gold[®] (Syngenta Proteção de cultivos Ltda). A primeira adubação de cobertura ocorreu aos 22 dias após plantio (DAP), com 112 kg ha^{-1} de uréia (45% de N_2). Aos 25 DAP, para controle da Lagarta do Cartucho (*Spodoptera frugiperda* L.), aplicou-se 150 mL ha^{-1} do inseticida Karatê Zeon 50 CS[®] (Syngenta Proteção de cultivos Ltda). Completados 30 DAP foi aplicado $0,5 \text{ L}$ por 100 L d'água do herbicida Roundup Original[®] (Monsanto do Brasil Ltda) para controle de ervas daninhas com jato dirigido nas entrelinhas de plantio. A segunda adubação de cobertura se deu aos 54 DAP, 112 kg ha^{-1} de ureia (45% de N_2). Para E_1 e E_2 , no período compreendido entre 35 e 45 DAP, alguns insetos como: marimbombos, mosca varejeira (*Dermatobia hominis*), serra pau (*Oncideres impluviata*) surgiram na área experimental e foram controlados com uma aplicação do inseticida Connect[®] (Bayer S/A) na dosagem de 750 mL ha^{-1} .

4.1.2.7. Variáveis avaliadas

Transcorridos 120 DAS, finalizando a maturidade, a área útil colhida manualmente por parcela correspondeu às três linhas do interior da parcela, sendo três metros da linha central e 1,5 m das linhas laterais. Os componentes de produção de milho foram expressos por meio das variáveis: massa de mil grãos (MMG $\text{g } 1000 \text{ grãos}^{-1}$), número de espigas por parcela (NEP un parcela^{-1}), rendimento de grãos secos (RGS kg

ha⁻¹), comprimento de espiga (CES cm espiga⁻¹), diâmetro de espiga (DES mm espiga⁻¹), número de linhas por espiga (NLE un espiga⁻¹), número de grãos por linha (NGL un linha⁻¹), número de grãos por espiga (NGE un espiga⁻¹), massa de grãos por espiga (MGE g espiga⁻¹), massa de sabugo (MAS g sabugo⁻¹), massa de espiga despalhada (MED g espiga⁻¹) e massa de palhas (MPA g) de milho.

A eficiência agrônômica do uso da água foi estimada conforme metodologia de Faraco et al. (2016), sendo expressa em função da matéria seca (EUA_{MS}) e do rendimento de grãos (EUA_{RG}). Para tanto, a EUA_{MS} foi calculada por meio da relação entre a produção total de matéria seca das plantas (kg ha⁻¹) e o volume de água consumido (lâmina + precipitação em m³ ha⁻¹), enquanto que a EUA_{RG} foi obtida pela relação entre o rendimento de grãos obtido (kg ha⁻¹) e o volume de água consumido (m³ ha⁻¹). A EUA é expressa em quilograma de matéria seca ou de grãos de milho por metro cúbico de água (kg m⁻³). Salienta-se que, em virtude da natureza desta variável, a mesma não foi incluída no banco de dados para análise estatística, evitando-se multicolinearidade e resultados redundantes (GUILHEN et al., 2016; LINDNER & PITOMBO, 2016).

4.1.2.8. Análise estatística

Os dados originais foram submetidos à análise de variância univariada e, constatada diferença entre os tratamentos, utilizou-se análise de regressão polinomial para evidenciar as melhores lâminas de irrigação estimadas (Barbosa e Maldonado Júnior, 2015). Posteriormente, os dados foram padronizados, de modo a tornar a média nula e variância unitária. A estrutura multivariada dos resultados foi avaliada por meio da Análise exploratória de Componentes Principais (ACP), condensando-se a quantidade de informação relevante contida no conjunto de dados originais em um menor número de dimensões, resultantes de combinações lineares das variáveis originais geradas a partir dos autovalores mais elevados na matriz de covariância (HAIR et al., 2009).

4.1.3. Resultados

Com base nos resultados das análises de variância, verificou-se que não houve diferença significativa entre as lâminas de irrigação ($p > 0,05$) para os componentes de produção estudados no primeiro experimento (11/04/2015 a 11/08/2015). Por outro lado,

no segundo experimento (25/08/2015 a 25/12/2015), foram constatadas diferenças significativas entre as lâminas de irrigação aplicadas ($p < 0,05$) para a variável número de linhas por espiga e para o número de grãos por espiga. Embora não tenha sido constatada diferença significativa pelo teste F, houve ajuste de regressão linear para as médias das variáveis: massa de mil grãos, rendimento de grãos secos, número de grãos por linha, massa de sabugo e massa de espiga despalhada e ajuste quadrático para número de grãos por espiga (Tabela 3).

Tabela 3. Resumo das análises de variância para as variáveis: massa de mil grãos (MMG, g), número de espigas por parcela (NEP, unidades), rendimento de grãos secos (RGS, kg ha⁻¹), comprimento de espiga (CES, cm), diâmetro de espiga (DES, mm), número de linhas por espiga (NLE, unidades), número de grãos por linha (NGL, unidades), número de grãos por espiga (NGE, unidades), massa de grãos por espiga (MGE, g), massa de sabugo (MAS, g), massa de espiga despalhada (MED, g) e massa de palhas (MPA, g) de milho sob lâminas de irrigação em Pão de Açúcar, AL, 2015.

FV	GL	Quadrados Médios					
		Primeiro Experimento					
		MMG	NEH	RGS	CES	DES	NLE
Lam	5	106,13 ^{ns}	9440937,60 ^{ns}	1255889,74 ^{ns}	0,53 ^{ns}	10,02 ^{ns}	1,90 ^{ns}
Lin	1	192,37 ^{ns}	761216,00 ^{ns}	627796,98 ^{ns}	0,80 ^{ns}	8,79 ^{ns}	1,03 ^{ns}
Qua	1	146,61 ^{ns}	22788539,83 ^{ns}	497412,03 ^{ns}	5E-6 ^{ns}	1,48 ^{ns}	3,12 ^{ns}
Blo	3	210,57 ^{ns}	29599286,50 ^{ns}	1819841,37 ^{ns}	0,41 ^{ns}	12,64 ^{ns}	1,98 ^{ns}
Res	15	206,11	19759332,60	1402369,74	0,64	14,05	1,31
CV(%)		4,83	6,97	11,55	4,95	7,17	6,38
		NGL	NGE	MGE	MAS	MED	MPA
Lam	5	4,03 ^{ns}	3287,03 ^{ns}	195,42 ^{ns}	11,23 ^{ns}	455,23 ^{ns}	20,13 ^{ns}
Lin	1	12,41 ^{ns}	949,75 ^{ns}	219,43 ^{ns}	35,50 ^{ns}	1331,65 ^{ns}	54,44 ^{ns}
Qua	1	0,02 ^{ns}	2964,93 ^{ns}	52,86 ^{ns}	7,81 ^{ns}	74,30 ^{ns}	0,28 ^{ns}
Blo	3	2,46 ^{ns}	4185,50 ^{ns}	156,91 ^{ns}	4,77 ^{ns}	284,70 ^{ns}	23,46 ^{ns}
Res	15	3,20	1611,92	381,25	23,29	635,92	23,99
CV(%)		5,70	7,09	9,42	11,40	10,22	13,14
		Segundo Experimento					
		MMG	NEH	RGS	CES	DES	NLE
Lam	5	2018,70 ^{ns}	276643036,44 ^{ns}	6839977,07 ^{ns}	2,13 ^{ns}	7,74 ^{ns}	0,37*
Lin	1	8450,23*	311139045,99 ^{ns}	31172451,87**	5,15 ^{ns}	15,48 ^{ns}	0,04 ^{ns}
Qua	1	535,59 ^{ns}	1343875,19 ^{ns}	303713,92 ^{ns}	2,18 ^{ns}	17,64 ^{ns}	0,45 ^{ns}
Blo	3	415,10 ^{ns}	259378252,71 ^{ns}	300225,49 ^{ns}	0,92 ^{ns}	44,31 ^{ns}	0,97*
Res	15	1064,81	99635741,17	2520608,79	1,92	14,39	0,13
CV(%)		16,08	17,14	26,93	9,02	8,79	2,02
		NGL	NGE	MGE	MAS	MED	MPA
Lam	5	11,21 ^{ns}	5899,18**	4577,32 ^{ns}	53,98 ^{ns}	5427,06 ^{ns}	424,79 ^{ns}
Lin	1	41,27**	20153,68**	11610,38 ^{ns}	254,41*	15301,25*	42,04 ^{ns}
Qua	1	13,11 ^{ns}	6835,78*	3264,50 ^{ns}	0,02 ^{ns}	3278,94 ^{ns}	78,98 ^{ns}
Blo	3	15,08*	6102,68**	2751,03 ^{ns}	45,02 ^{ns}	3115,63 ^{ns}	843,35 ^{ns}
Res	15	4,32	804,77	2677,55	39,01	3078,85	577,52
CV(%)		6,57	5,11	40,42	26,89	36,68	80,59

** , * e ns: significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste F; FV: fontes de variação; GL: graus de liberdade; Lam: lâminas de irrigação; Lin: regressão linear; Qua: regressão quadrática; Blo: blocos; Res: resíduo e CV: coeficientes de variação.

No segundo experimento (E₂), maior acúmulo de massa de mil grãos (230,3 g), rendimento de grãos secos (7.561,7 kg ha⁻¹) e número de grãos por linhas (33,6 un linha⁻¹) foram obtidos com a lâmina de irrigação de 801 mm ciclo⁻¹. Foram calculados incrementos de 24%, 44% e 12%, respectivamente para essas variáveis, em relação às plantas cultivadas sob lâmina crítica de 229 mm ciclo⁻¹, tendo esta lâmina de água promovido menores valores de massa (175,4 g), rendimento (4.225,0 kg ha⁻¹) e grãos por linha (29,7 un linha⁻¹), conforme ilustrado nas Figuras 1A, B e C.

Houve aumento de 17,2% no número de grãos por espiga na medida em que as lâminas de irrigação foram aumentadas, registrando-se valor mais expressivo (593 unidades espiga⁻¹) com a lâmina estimada de 681 mm ciclo⁻¹, contrastando-se com os 490,9 grãos espiga⁻¹ evidenciados na menor lâmina (229 mm ciclo⁻¹) aplicada. Não obstante, o incremento de lâminas acima de 681 mm ciclo⁻¹ promoveu redução de 1% até o limite de lâmina de 801 mm ciclo⁻¹, na qual foram quantificados 585,8 grãos espiga⁻¹ (Figura 1 D).

O aumento das lâminas de água até 801 mm ciclo⁻¹ promoveu ganhos expressivos de 32% e 39% na massa de sabugos e massa de espiga despilhada, sendo registrados 28 g sabugo⁻¹ e 188,2 g espiga⁻¹, respectivamente para estas variáveis, sendo estes ganhos percentuais calculados a partir das menores massas de sabugo (18,5 g sabugo⁻¹) e de espiga despilhada (114,3 g espiga⁻¹) obtidas na menor lâmina de 229 mm ciclo⁻¹ (Figuras 1E e F).

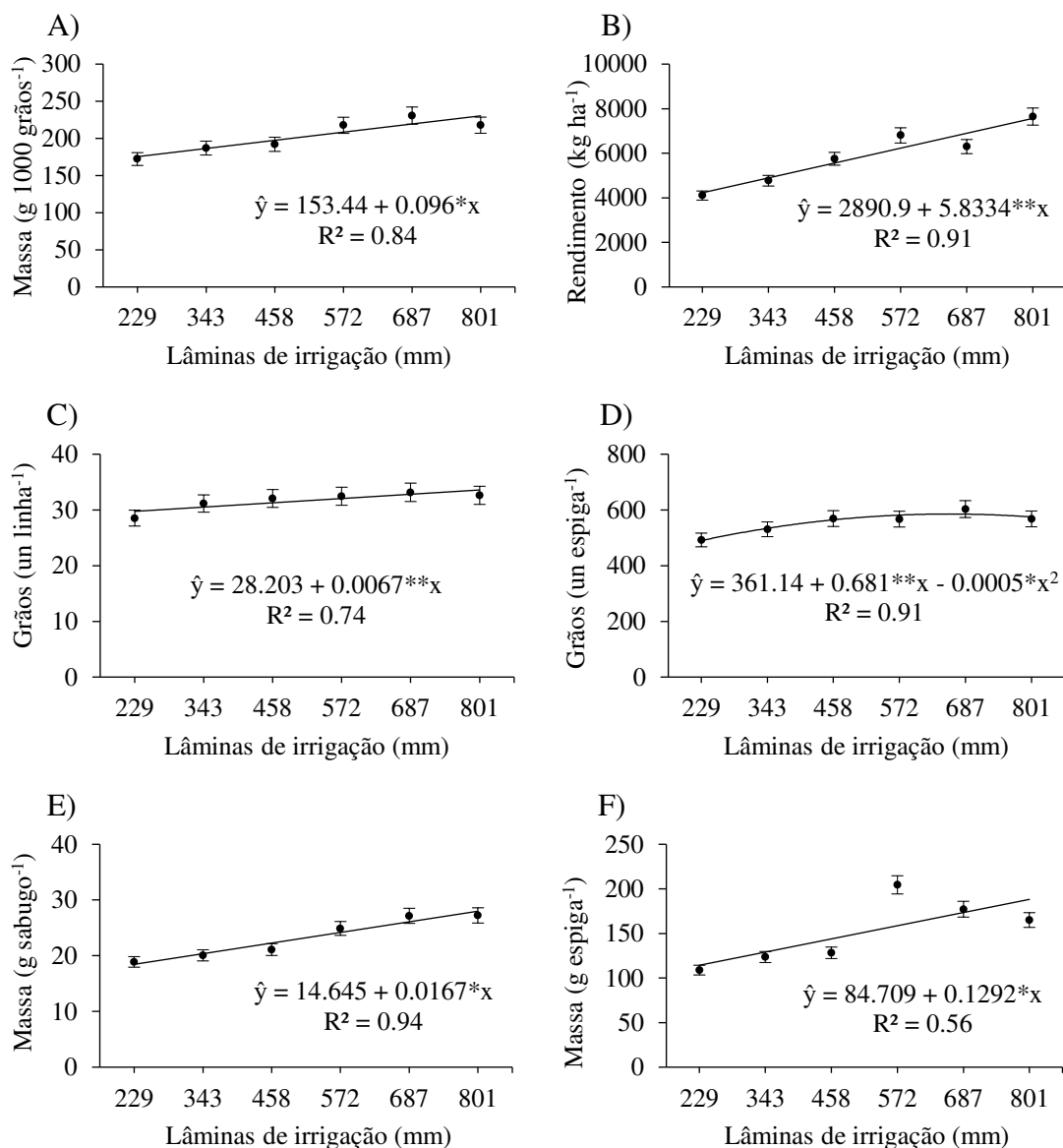


Figura 1. Componentes de produção: Massa de mil grãos (A), rendimento de grãos secos (B), número de grãos por linha (C), número de grãos por espiga (D), massa de sabugo (E) e massa de espiga de milho despalhada sob lâminas de irrigação suplementar no experimento 2.

Foi possível reduzir o espaço multidimensional do conjunto original de variáveis em três Componentes Principais (CP) com autovalores maiores que a unidade ($\lambda > 1,0$), conforme preconiza o critério de Kaiser para escolha de CPs. Juntos, os Componentes escolhidos explicam 88,56% da variância total, sendo que o primeiro Componente Principal (CP₁) retém 61,3% da variância total acumulada, enquanto que o segundo e

terceiro Componentes (CP₂ e CP₃) contribuem com 15,2% e 12,1%, respectivamente, desta variância. No CP₁, foram elencadas sete variáveis com carga fatorial (r) expressiva, enquanto que nos CP₂ e CP₃ duas variáveis se destacaram. Em todos os Componentes, a associação entre as variáveis expressivas e o CP foi classificada como forte, conforme classificação de Dancey e Reidy (2013), em que: $r = |0,10|$ até $|0,30|$ (fraca); $r = |0,40|$ até $|0,6|$ (moderada); $r = |0,70|$ até $|1,00|$ (forte) (Tabela 4).

Tabela 4. Autovalores maiores que a unidade, porção da variância explicada e coeficientes de correlação entre os componentes principais das 12 variáveis. Pão de Açúcar, AL, 2015.

CPs	λ	$\sigma^2\%$	Cargas das Variáveis (r)											
			MMG	NEP	RGS	CES	DES	NLE	NGL	NGE	MGE	MAS	MED	MPA
CP1	7,36	61,34	-0,96*	-0,56	-0,98*	-0,83*	-0,92*	-0,46	-0,33	-0,57	-0,96*	-0,96*	-0,97*	-0,42
CP2	1,82	15,16	-0,24	-0,04	-0,13	0,36	-0,30	0,25	0,85*	0,80*	-0,11	-0,23	-0,12	-0,14
CP3	1,45	12,06	0,03	-0,71*	-0,08	-0,21	0,07	0,59	-0,08	0,12	-0,04	0,03	-0,05	0,72*

CPs: componentes principais; λ : autovalores; $\sigma^2\%$: porção de variância explicada; *: coeficiente de correlação expressivo entre a variável e o CP.

A partir da projeção dos escores fatoriais dos dois primeiros CPs em duas dimensões, constatou-se que 61,34% da variância devem-se à variação temporal representada pelas épocas experimentais (E), de modo que os escores do primeiro experimento (primeira época experimental, E₁), bem como a direção das variáveis, assumem posições relativas à esquerda no CP₁ enquanto que os do segundo experimento (segunda época experimental, E₂) localizam-se à direita. No CP₂, é possível observar que 15,16% da variância devem-se à separação entre as lâminas de irrigação (L) nos planos superior e inferior. A inobservância de ordem hierárquica entre as lâminas na E₁ denota não haver efeito expressivo das mesmas nesta época. Por outro lado, o fato das maiores lâminas (L₅ e L₆) terem assumido posição no plano superior da projeção bidimensional evidencia influência positiva destas sobre o conjunto de variáveis projetadas no CP₂ quando comparadas a L₁ (Figuras 2A e B).

No CP₃, observa-se que a L₃ se sobressaiu às demais lâminas na E₁ evidenciando a massa de palhas com elevado poder discriminatório, enquanto que na E₂ as lâminas L₂ e L₅ proporcionaram maior massa de palhas em detrimento do número de espigas por

parcela, tendo esta última variável melhores resultados nas lâminas L₃, L₄ e L₆, enfatizando-se a relação inversa entre estas duas variáveis do CP3 (Figuras 2C e D).

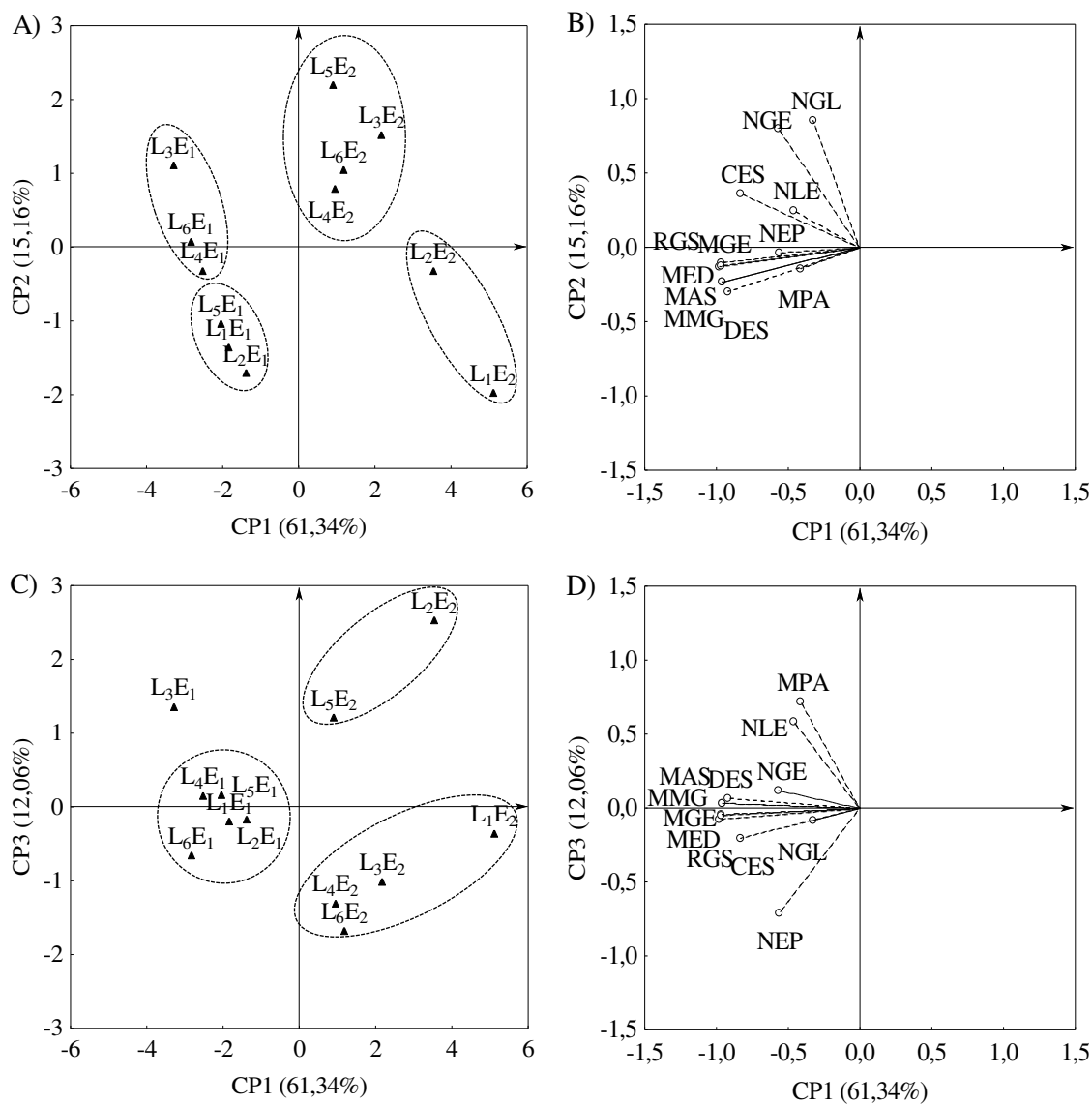


Figura 2. Projeção bidimensional das lâminas de irrigação (L), épocas experimentais (E) e das 12 variáveis nos componentes principais 1 x 2 (A e B) e 1 x 3 (C e D). L₁E₁=19 mm, L₂E₁=28 mm, L₃E₁=38 mm, L₄E₁=47 mm, L₅E₁=56 mm, L₆E₁=66 mm, L₁E₂=229 mm, L₂E₂=343 mm, L₃E₂=458 mm, L₄E₂=572 mm, L₅E₂=687 mm, L₆E₂=801 mm, E₁=11/04/2015-11/08/2015, E₂=25/08/2015-25/12/2015.

O aumento das lâminas de irrigação não influenciou a eficiência de uso de água das plantas de milho na primeira época experimental (primeiro experimento). Por outro

lado, houve expressiva redução ($p < 0,01$) da EUA_{MS} na segunda época experimental (segundo experimento), denotando menor alocação de fitomassa em função de cada unidade de água absorvida durante o ciclo. Salienta-se que a EUA_{RG} se manteve inalterada independente da época experimental e da lâmina (Tabela 5).

Tabela 5. Eficiência de uso da água (kg m^{-3}) pelo milho sob lâminas de irrigação suplementar. Pão de Açúcar, AL, 2015.

Eficiência	Primeira Época Experimental						Ajuste de regressão		
	Lâminas de irrigação ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)						α	βx_i	R^2
	19	28	38	47	56	66			
EUA_{MS}	5,95	5,62	5,80	5,20	5,91	5,86	5,74	-5E-4 ^{ns}	1E-3
EUA_{RG}	2,69	2,58	2,70	2,51	2,38	2,59	2,74	-3E-3 ^{ns}	0,32
$RG (\text{t ha}^{-1})$	11,4	11,7	12,5	11,8	11,4	12,7			
	Segunda Época Experimental						α	βx_i	R^2
	229	343	458	572	687	801			
	EUA_{MS}	3,87	3,21	3,30	2,74	2,49	2,51	4,24	-2E-3 ^{**}
EUA_{RG}	1,01	0,95	0,95	1,35	1,00	0,85	1,06	-5E-5 ^{ns}	5E-3
$RG (\text{t ha}^{-1})$	4,7	5,5	6,6	10,9	9,2	8,8			

EUA : eficiência de uso da água, MS : matéria seca total das plantas, RG : rendimento de grãos secos, α : intercepto populacional, β : inclinação populacional, x_i : variável independente, R^2 : coeficiente de determinação, **: significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$) e ns: não significativo ($p > 0,05$) pelo teste t.

4.1.4. Discussão

Incrementos nos componentes de produção do milho em resposta ao aumento das lâminas de irrigação eram esperados nas condições em que o experimento foi desenvolvido, uma vez que a área experimental está localizada em região semiárida, sendo caracterizada pela limitação temporal e espacial de recursos hídricos, requerendo o uso de irrigação suplementar para atender a demanda da cultura (SILVA et al., 2015). Ressalte-se que o uso de irrigação para complementação da água precipitada naturalmente consiste em importante estratégia de manejo no cultivo de milho, evitando, sobretudo, a deficiência hídrica em fases cruciais de desenvolvimento e produção (RIBEIRO et al., 2015).

O fornecimento de água em maiores quantidades decorrentes das lâminas de irrigação contribuiu para aumentar a umidade do solo e suprir a necessidade da cultura em sua plenitude, uma vez que o milho é muito exigente e possui alta demanda hídrica para proporcionar maior produção (SILVA et al., 2012; XAVIER et al., 2014). Mesmo

quando irrigadas com as menores lâminas, o rendimento de grãos secos foi superior à média nacional (3.620 kg ha^{-1}), alcançando com as maiores lâminas valores superiores à produtividade média da China (5.560 kg ha^{-1}), embora abaixo do rendimento médio de 9.660 kg ha^{-1} dos Estados Unidos (RIBEIRO et al., 2015).

Minuzzi & Lopes (2015) reportam que o clima é o principal fator relacionado à produção do milho. Assim, as repostas mais pronunciadas nos componentes de produção ocorridas na segunda época experimental (E_2) estão associadas às variáveis climáticas específicas dessa época, sobretudo à baixa precipitação pluviométrica, 78,0% menor que na E_1 ; à radiação global (R_g), radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e balanço de radiação (R_n), que tiveram aumentos de 21,5%, 21,5% e 21,4%, respectivamente, promovendo elevação de 4,5% na temperatura média da atmosfera e redução de 12,6% na umidade relativa do ar, de modo que a associação destes fatores contribuíram para aumento de 26,3% na evapotranspiração da cultura em relação aos dados registrados na E_1 (Tabela 1).

Assim, é possível inferir que as baixas produtividades ocorridas nas plantas na E_2 quando irrigadas com menores lâminas, estejam relacionadas à menor disponibilidade de água no solo e consequente estresse hídrico, sobretudo em virtude do déficit de água ocasionar redução do aparato fotossintético, assimilação de CO_2 e alocação de fitomassa, estimulando maior acúmulo de açúcares solúveis nas folhas e diminuição na quantidade de amido (COSTA et al., 2008; MINUZZI & LOPES (2015).

Melo et al. (2010) reportam que, se o déficit hídrico ocorrer no período crítico, a recuperação da capacidade produtiva da cultura não ocorrerá de forma satisfatória, e a produção final será severamente reduzida. Em sentido complementar, Bergamaschi et al. (2006) mencionam que as reduções mais severas na produção ocorrem em decorrência de déficit hídrico nas fases de polinização, formação do zigoto e desenvolvimento inicial do grão.

Sabendo-se que os componentes de produção são função da dinâmica fotossintética, pode-se inferir que, sob déficit hídrico moderado, ocorreu decréscimo na taxa fotossintética, porém, as reações luminosas, de transporte de elétrons e de redução do NADP^+ foram mantidas, causando um desequilíbrio energético (LAWLOR e TEREZA, 2009). Isso pode ter resultado na síntese de espécies reativas de oxigênio (ROS), que danificaram a enzima ATPsintase, retardando a síntese de ribulose 1,5-

bifosfato (RuBP) e havendo decréscimo na atividade da Rubisco, sendo estes eventos fisiológicos refletidos em menor rendimento e componentes de produção nas menores lâminas (CHAVARRIA et al., 2015).

A redução do espaço multidimensional dos dados destes experimentos em espaço de menor dimensão, consiste em estratégia importante para melhor compreensão dos resultados, constituindo importante ferramenta auxiliar na tomada de decisões sobre o cultivo de milho irrigado com lâminas de água variáveis. De fato, analisar e compreender estudos complexos é uma tarefa desafiadora, sobretudo devido ao elevado volume de dados envolvidos e ocorrência de multicolinearidade entre variáveis, evidenciando o emprego de análises multivariadas, por exemplo Análise de Componentes Principais, como ferramenta eficiente para mitigar estas dificuldades (RANAMUKHAARACHCHI et al., 2017; YI et al., 2017).

Salienta-se que a cultura do milho é caracterizada por exigir uma alta demanda hídrica e também por ser uma das mais eficientes no uso da água, ou seja, tem uma alta relação de produção de matéria seca por unidade de água absorvida (SILVA et al., 2012). Assim, a estabilidade na EUA na primeira época experimental pode ser explicada pelo elevado volume de precipitação pluvial e pela complementação da água requerida via irrigação. A redução da EUA_{MS} na segunda época experimental, está atrelada às características climáticas e às respostas fisiológicas das plantas. O sistema de plantio adotado pode ter contribuído para manutenção da umidade do solo e melhor aproveitamento da água mesmo nas menores lâminas, sendo esta informação ratificada por Murga-Orrillo et al. (2016) que encontraram maior EUA em solo coberto.

Em pesquisa com lâminas de irrigação, Souza et al. (2011) obtiveram valores de EUA superiores aos evidenciados nesta pesquisa. Os autores justificam o ganho na EUA em virtude da cultivar utilizada ter sido melhorada para adaptação às condições de semiaridez. Porém, os valores de EUA encontrados nesta pesquisa estão próximos aos informados por Minuzzi & Lopes (2015) que estimaram valores da EUA do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil e encontraram para as condições atuais valores de $2,8 \text{ kg m}^{-3}$ (Catalão-GO), $2,61 \text{ kg m}^{-3}$ (Rio Verde-GO), $2,99 \text{ kg m}^{-3}$ (Ponta Porã-MS), $2,91 \text{ kg m}^{-3}$ (Invinhema-MS), e $2,43 \text{ kg m}^{-3}$ (Diamantino-MT).

4.1.5. Conclusões

Os componentes de produção e eficiência de uso da água do milho híbrido AG 7088 não foram influenciados pela variação de lâminas de irrigação na primeira época experimental.

Na segunda época experimental, o aumento das lâminas de irrigação até 175% de reposição da ET_0 promoveu ganhos expressivos na massa de mil grãos, rendimento de grãos secos, número de grãos por linha, massa de sabugo e massa de espiga despalhada, enquanto o maior número de grãos por espiga foi obtido com a reposição de 150% da ET_0 , havendo redução da eficiência de uso da água em resposta ao aumento das lâminas.

O emprego de análise multivariada de Componentes Principais foi eficiente para reduzir o espaço multidimensional do conjunto original de variáveis em três dimensões com informações relevantes para evidenciar diferenças entre lâminas de irrigação e épocas experimentais, evidenciando a reposição de 150% da ET_0 como a mais recomendada para produzir maior número de grãos por espiga e maior número de grão por linha na segunda época experimental.

4.1.6. Referências

ALDERFASI, A. A.; SELIM, M. M.; ALHAMMAD, B. A. Evaluation of plant densities and various irrigation regimes of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under low water supply. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, p. 1-8, 2016.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **Experimentação Agrônômica & AgroEstat - Sistema para Análises Estatísticas de Ensaio Agronômicos**. Jaboticabal: Funep, 2015. 396 p.

BARROS, A. H. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SILVA, A. B.; SANTIAGO, G. A. C. F. **Climatologia do Estado de Alagoas**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Recife: Embrapa Solos, 2012. 32 p.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MÜLLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.;

PEREIRA, P. G. Déficit Hídrico e Produtividade na Cultura do Milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 243-249, 2006.

CHAVARRIA, G.; DURIGON, M. R.; KLEIN, V. A.; KLEBER, H. Restrição fotossintética de plantas de soja sob variação de disponibilidade hídrica. **Ciência Rural**, v. 45, n. 8, p. 1387-1393, 2015.

COSTA, J. R.; PINHO, J. L. N.; PARRY, M. M. Produção de matéria seca de cultivares de milho sob diferentes níveis de estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 5, p. 443-450, 2008.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia**. Porto Alegre: Artmed, 2013. 608 p.

DANTAS JÚNIOR, E. E.; GARÓFALO, L. H.; COSTA, F. A. M.; KORNDORFER, G. H. Desenvolvimento de milho irrigado e adubado com silicato de cálcio e magnésio. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 5, n. 4, p. 337-350, 2011.

FARACO, J. R.; CASTRO, N. M. R.; LOUZADA, J. A.; SILVA, P. R. F.; SCHOENFELD, R.; MAASS, M. B.; PAGLIARINI, N. Rendimento de grãos e eficiência do uso de água da cultura do milho em áreas de cultivo de arroz inundado com diferente manejo de irrigação e drenagem. **Revista IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 274-290, 2016.

GUILHEN, J. H. S.; MARÇAL, T. S.; ZANOTTI, R. F.; LOPES, J. C.; FERREIRA, A. Physiological characteristics in seeds of the common bean under multicollinearity and conditions of salinity. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 1, p. 127-134, 2016.

HAIR, F. J.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise Multivariada de Dados**. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.

KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra: Fondo de Cultura Económica**. México: Editora, 1948. 479 p.

LAWLOR, D. W.; TEZARA, W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. **Annals of Botany**, v. 103, n. 4, p. 561-579, 2009.

LINDNER, A.; PITOMBO, C. S. Modelo logit binomial com componentes principais para estimação de preferência por modo de transporte motorizado. **Journal of Transport Literature**, v. 10, n. 3, p. 5-9, 2016.

LI, Z.; SUN, Z. Optimized single irrigation can achieve high corn yield and water use efficiency in the Corn Belt of Northeast China. **European Journal of Agronomy**, v. 75, n. 4, p. 12-24, 2016.

MELO, T. M.; WOTTRICH, I.; LOUZADA, J. A.; HELFER, F. Avaliação do atendimento da demanda hídrica da cultura do milho através da subirrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 4, n. 4, p. 226-233, 2010.

MINUZZI, R. B.; LOPES, F. Z. Desempenho agrônômico do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, p. 734-740, 2015.

MURGA-ORRILLO, H.; ARAÚJO, W. F.; ABANTO-RODRIGUEZ, C.; SAKAZAKI, R. T.; BARDALEZ LOZANO, R. M.; POLO-VARGAS, A. R. Influência da cobertura morta na evapotranspiração, coeficiente de cultivo e eficiência de uso de água do milho cultivado em cerrado. **Revista IRRIGA**, v. 21, n. 2, p. 352-364, 2016.

RANAMUKHAARACHCHI, S. A.; PEIRIS, R. H.; MORESOLI, C. Fluorescence spectroscopy and principal component analysis of soy protein hydrolysate fractions and the potential to assess their antioxidant capacity characteristics. **Food Chemistry**, v. 217, n. 1, p. 469-475, 2017.

RIBEIRO, R. B.; CARVALHO, C. M.; FEITOSA, H. O.; FEITOSA, S. O.; SILVA, S. L. Crescimento do milho BRS catingueiro irrigado no cariri cearense. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 8, n. 3, p. 81-86, 2015.

SILVA, J. N.; LINHARES, P. C. A.; FIGUEREDO, J. P.; IRINEU, T. H. S.; SILVA, J. N.; ANDRADE, R. Crescimento do milho bandeirante sob lâminas de irrigação e *mulching*. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 11, n. 4, p. 87-96, 2015.

SILVA, M. R. R.; VANZELA, L. S.; VAZQUEZ, G. H.; SANCHES, A. C. Influência da irrigação e cobertura morta do solo sobre as características agrônômicas e produtividade de milho. **Revista IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 170-180, 2012.

SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Eficiência do uso da água das culturas do milho e do feijão-caupi sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado no semiárido brasileiro. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 715-721, 2011.

WU, G.; JOHNSON, S.; BORNMAN, J. F.; BENNETT, S. J.; FANG, Z. Changes in whole grain polyphenols and antioxidant activity of six sorghum genotypes under different irrigation treatments. **Food Chemistry**, v. 214, n. 1, p. 199-207, 2017.

XAVIER, D. A.; FURTADO, G. F.; SOUSA JÚNIOR, J. R.; SOUSA, J. R. M.; ANDRADE, E. M. G. Produção de fitomassa do milho sob lâminas de irrigação e adubação nitrogenada. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 3, p. 144-148, 2014.

YI, S.; LAI, Z.; HE, Z.; CHEUNG, Y.; LIU, Y. Joint sparse principal component analysis. **Pattern Recognition**, v. 61, n. 1, p. 524-536, 2017.

5. CAPÍTULO 2

5.1. Calibração do modelo AquaCrop/FAO® para a cultura do milho sob irrigação no semiárido Alagoano

Resumo

Devido à expressividade da cultura do milho, estratégias de manejo da irrigação são necessárias, notadamente em regiões de escassez hídrica. Objetivou-se com este trabalho calibrar o modelo AquaCrop/FAO® v. 5.0 para a cultura do milho híbrido AG 7088 cultivado sob lâminas de irrigação nas condições agroclimáticas de Pão de Açúcar no semiárido Alagoano. Foram realizados dois experimentos em duas épocas distintas, entre os meses de abril a dezembro de 2015, em delineamento de blocos ao acaso com seis lâminas de irrigação e quatro repetições. Para época 1 (E₁) A performance geral do modelo AquaCrop® é boa, com $10,97\% \leq nRMSE \leq 16,71\%$ para as lâminas L₁ a L₄, e excelente para L₆ (nRMSE=3,44%) e L₅ (nRMSE=3,81%). A E₂ apresentou L₆ como excelente (nRMSE=8,3%), as lâminas L₂, L₄ e L₅, boa ($10,2 < nRMSE < 15,0\%$) e fraco para L₁ e L₃ ($20,3 < nRMSE < 25,7\%$). A cobertura do dossel para E₁ esta compreendida para *d* (0,96-0,98), *r* (0,99-1,0) e RMSE (0,11-0,13%) e E₂ para *d* (0,93-0,99), *r* (0,91 a 0,99) e RMSE (0,06-0,16). Os índices de colheita para E₁ variou de 40,3 a 48,3%, enquanto para E₂ de 26,2 a 49%. Foi evidenciada boa performance, exatidão e qualidade de ajuste do modelo AquaCrop® entre valores observados e simulados.

Palavras-chave: *Zea mays* L., Modelagem, Manejo de água, Acúmulo de biomassa.

4.1.1. Introdução

Inúmeras discussões têm sido levantadas acerca de estratégias mitigadoras dos impactos causados pelas ações antrópicas, notadamente no âmbito de emissões de gases e conseqüente mudanças climáticas (AAMAAS & PETERS, 2017). Essas mudanças decorrem, principalmente, do uso de recursos naturais em demasia, o que tem ocorrido com maior intensidade para atender a demanda por alimentos da população em expansão (BENTON, 2017).

Esse cenário de mudanças do clima em escala local e global reflete na produção das culturas, notadamente pela possível limitação dos recursos naturais. Nesse sentido, o recurso água consiste em fator de produção decisivo para os cultivos por ser considerado limitante para o crescimento com notórias funções no metabolismo vegetal. Ressalte-se que o déficit hídrico é um dos fatores responsáveis pelas baixas produtividades das culturas em regiões semiáridas, merecendo destaque no que tange ao desenvolvimento de estratégias promissoras para mitigar seu efeito negativo (ALDERFASI et al., 2016; WU et al., 2017).

Assim, faz-se necessário que sejam desenvolvidas estratégias para subsidiar a tomada de decisões para novas safras de milho em regiões semiáridas. Essas medidas são necessárias, pois a disponibilidade hídrica no Nordeste brasileiro mais especificamente no Semiárido é limitante para a produção, devido a irregularidade e mal distribuição das chuvas (CIRILO et al., 2017). Embora a cultura do milho seja muito eficiente em utilização de água, mesmo em ambientes restritivos, o uso de lâminas de irrigação localizada vem sendo adotado para suprimento da demanda hídrica do cereal, visando o uso racional da água (SILVA et al., 2015).

O emprego de modelagem na agricultura representa importante estratégia para auxiliar os produtores, notadamente por possibilitar a estimativa do desempenho agrônomo da cultura em diferentes cenários climáticos (MINUZZI & LOPES, 2015); estimar a produção em condições de déficit hídrico (ANONI, 2016; OLIVEIRA et al., 2016). Pode-se inferir que o emprego da modelagem na agricultura, sobretudo o modelo AquaCrop® na cultura do milho irrigado no estado de Alagoas, Nordeste do Brasil, é de fundamental importância para a tomada de decisões acerca do incremento qualitativo de tecnologias para cultivo deste cereal na região.

Objetivou-se com este trabalho calibrar o modelo AquaCrop/FAO® para a cultura do milho híbrido AG 7088 cultivado sob lâminas de irrigação nas condições agroclimáticas de Pão de Açúcar no semiárido Alagoano.

5.1.2. Material e Métodos

5.1.2.1. Caracterização da área experimental

Foram realizados dois experimentos em duas épocas distintas, sendo a primeira época (E₁) conduzida no período compreendido entre os meses de abril e agosto de 2015 e a segunda época (E₂) entre agosto e dezembro do mesmo ano. A área experimental está localizada no município de Pão de Açúcar, estado de Alagoas, nas coordenadas (09° 45' 20,7" S; 37° 25' 12,3" W e altitude de 18 m). O clima local é classificado como BSh', com predomínio de caatinga hipoxerófila, conforme classificação de Köppen (1948). Apresenta temperatura média anual do ar de 27 °C e precipitação média anual de 500 mm (BARROS et al., 2012).

Durante as épocas de realização da pesquisa, foi feito monitoramento climático expresso por meio das variáveis agroclimáticas obtidas na estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia-INMET (09° 44' 56" S; 37° 25' 51" W e altitude de 15 m) localizada a 1,6 km da área experimental.

Na área experimental, previamente à montagem do primeiro experimento, foram coletadas 12 amostras simples de solo nas camadas de 0,00-0,30 m e 0,30-0,60 m de profundidade, sendo obtidas amostras compostas representativas de cada profundidade. As amostras foram devidamente acondicionadas e enviadas ao Laboratório de Irrigação e Salinidade da Universidade Federal de Campina Grande para análise dos atributos físicos (Tabela 1).

Tabela 1. Atributos físicos do solo da área experimental. Pão de Açúcar, AL, 2015.

Camadas	Atributos					
	Umidade CC (%)	PMP (%)	Saturação (%)	Densidade (g cm ⁻³)	K _{sat} (mm dia ⁻¹)	CN
0,00-0,30 m	22,61	6,43	48,13	1,39	884,00	65,00
0,30-0,60 m	26,47	6,45	47,78	1,41	1.481,00	65,00

CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; Saturação: conteúdo de água na saturação; K_{sat}: condutividade hidráulica saturada; CN: número da curva.

Para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) diária foi utilizado o método da FAO-Penman-Monteith com base no conjunto de dados completos (média diária de temperatura (°C), umidade relativa (%), pressão atmosférica (hPa), velocidade

do vento (m s^{-1}), radiação solar (kJ m^{-2}) e precipitação (mm) como descrito por Allen et al. (1998).

Na E_1 , foram registradas temperatura do ar mínima de 16,9 e máxima de 38,6, associadas à umidade relativa do ar média de 69,3% e média da radiação global média de 17,8 $^\circ\text{C}$, enquanto que na E_2 foi verificada redução de 16% na umidade relativa em relação à E_1 , com temperatura mínima de 17,4 $^\circ\text{C}$ e máxima de 41,9 $^\circ\text{C}$ e média da radiação de 25,0 $^\circ\text{C}$, caracterizando estação seca peculiar da região semiárida do país (Figura 1).

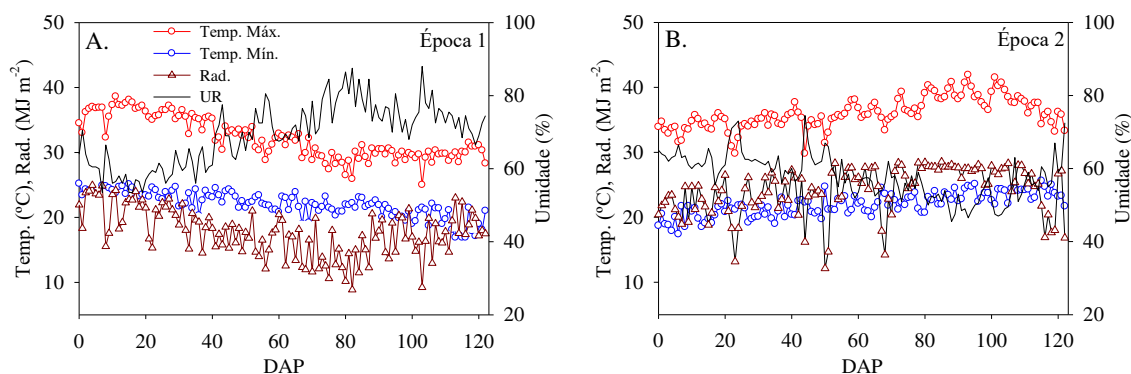


Figura 1. Temperatura máxima (Temp. Máx.) e mínima (Temp. Mín.), radiação (Rad.) e umidade relativa do ar (UR) para primeira (A) e segunda (B) época experimental em Pão de Açúcar, AL, 2015.

Os dados diários relativos a precipitação, lâminas de irrigação e evapotranspiração de referência para as duas épocas de plantio estão ilustrados na Figura 2. O valor máximo da ET_0 para a E_1 foi de 6,8 mm dia^{-1} , enquanto que o mínimo correspondeu a 1,7 mm dia^{-1} , com média de 4,18 mm dia^{-1} , totalizando 514,48 mm ciclo^{-1} . Na E_2 , os valores mínimo e máximo da ET_0 variaram entre 3,2 e 8,1 mm dia^{-1} , respectivamente, com média de 6,3 mm dia^{-1} , totalizando 773,27 mm ciclo^{-1} .

O ciclo da cultura, na E_1 , apresenta precipitação acumulada de 238 mm , bem distribuída, com maior intensidade entre 70 e 90 dias após o plantio (DAP) onde foi registrada precipitação de 130 mm . Todavia, na E_2 o volume precipitado foi de 50,8 mm , com diferença percentual de 78,6% em relação à E_1 , evidenciando período de escassez hídrica com risco de déficit hídrico no milho, ratificando a necessidade do uso de irrigação. Para suprir a água demandada pela cultura, na E_1 , foram aplicadas lâminas de irrigação correspondentes a 50% da ET_0 ($L_1=19 \text{ mm ciclo}^{-1}$); 75% da ET_0 ($L_2=28 \text{ mm ciclo}^{-1}$); 100% da ET_0 ($L_3=38 \text{ mm ciclo}^{-1}$); 125% da ET_0 ($L_4=47 \text{ mm ciclo}^{-1}$); 150% da

ET_o ($L_5=56$ mm ciclo⁻¹) e 175% da ET_o ($L_6=66$ mm ciclo⁻¹), enquanto que na E_2 os volumes de água repostos corresponderam a 50% da ET_o ($L_1=229$ mm ciclo⁻¹); 75% da ET_o ($L_2=343$ mm ciclo⁻¹); 100% da ET_o ($L_3=458$ mm ciclo⁻¹); 125% da ET_o ($L_4=572$ mm ciclo⁻¹); 150% da ET_o ($L_5=687$ mm ciclo⁻¹) e 175% da ET_o ($L_6=801$ mm ciclo⁻¹). Acrescente-se que nas duas épocas, durante os primeiros 15 DAP, foi aplicado lâmina diária de 12,5 mm totalizando ao final deste período o volume acumulado de 187,5 mm (Figura 2).

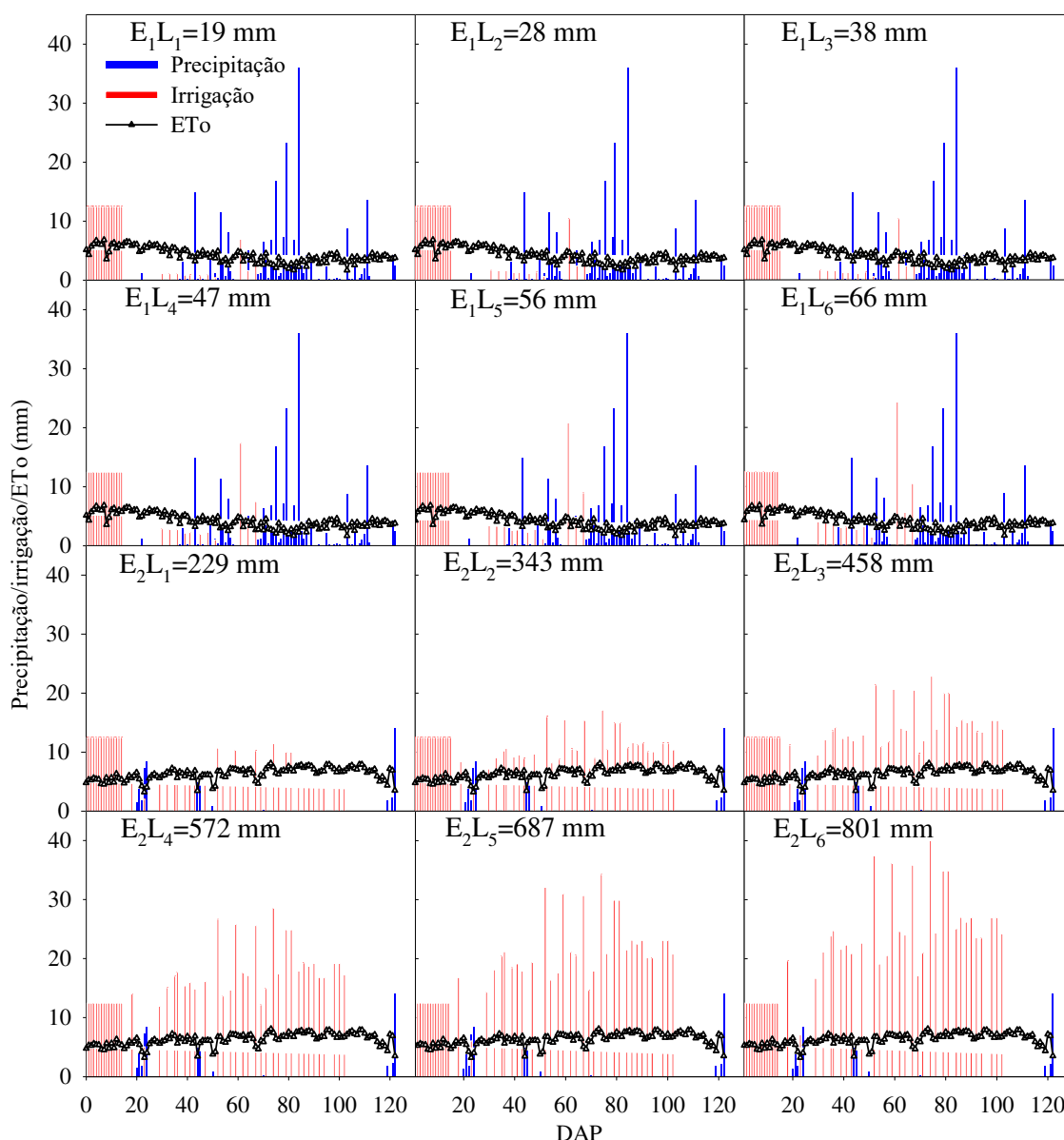


Figura 2. Precipitação e irrigação durante o ciclo da cultura do milho, Pão de Açúcar, 2015, AL. E_1 : primeira época experimental; E_2 : segunda época experimental; e L: lâmina de irrigação.

5.1.2.2. Delineamento experimental

O delineamento estatístico adotado foi em blocos casualizados com os tratamentos correspondentes a seis lâminas de irrigação (50%, 75%, 100%, 125%, 150% e 175% da ET_0) aplicadas nas duas épocas experimentais com quatro repetições.

5.1.2.3. Preparo da área

A área experimental total (480 m²) foi cultivada em Sistema de Plantio Direto, realizando-se dessecação da vegetação de cobertura com aplicação de 1 L ha⁻¹ (0,48 kg i.a. ha⁻¹) de Glifosato 15 dias antes da semeadura. A adubação de fundação foi realizada a partir da interpretação da análise de solo, aplicando-se 45 kg ha⁻¹ de N₂, 138 kg ha⁻¹ P₂O₅ e 37 kg ha⁻¹ de K₂O.

Cada parcela experimental ocupou área de 20,0 m² (5,0 m x 4,0 m), constituída de cinco linhas de irrigação de 5,0 m de comprimento, em espaçamento de 0,80 m entre linhas e 0,20 m entre plantas. Por ocasião da colheita, uma fileira de cada extremidade da parcela (bordadura) foi descartada, colhendo-se área útil de 12 m².

Utilizou-se sistema de irrigação localizada por gotejamento, constituído de fita gotejadora de 16 mm de diâmetro nominal, com emissores de vazão 7,5 L h⁻¹ espaçados a cada 0,20 m, operando sob pressão de serviço de 10 mca. Para automação do sistema, adotou-se um conjunto de seis eletroválvulas acionadas a partir de um programador de seis estações.

As medições de água no solo foram realizadas diariamente e registrado a média de umidade volumétrica a cada trinta minutos usando Reflectometria de Domínio de Tempo (TDR), (CS616, *Campbell Scientific*, Logan, Utah), ligado a um sistema de aquisição de dados CR1000. As hastes foram posicionadas verticalmente no solo, distantes 0,15 m das plantas e dentro das fileiras centrais, nas profundidades de 0,00-0,30 m e 0,30-0,60 m, conforme metodologia recomendada por Rocha et al. (2014). Na E₁, foram utilizados 12 sensores distribuídos no bloco dois nos tratamentos correspondentes às lâminas L₁, L₂ e L₄ e bloco três nas lâminas L₃, L₅ e L₆. Para E₂, apenas nos tratamentos correspondentes a L₁ e L₃, foram registradas a umidade até o final do ciclo de 120 dias.

5.1.2.4. Semeadura

A semeadura do híbrido AG 7088 da Agrocerec, é semeado para duas épocas de plantio (E_1 =experimento 1, de 11/04/2015 a 11/08/2015 e E_2 =experimento 2, de 25/08/2015 a 25/12/2015), adotando-se três sementes distribuídas igualmente em cada cova. Transcorridos 10 dias após o plantio (DAP), foi realizado desbaste adotando-se uma planta por cova, totalizando estande final de 62.500 plantas ha^{-1} .

5.1.2.5. Aplicação dos tratamentos

A aplicação das lâminas de irrigação correspondentes aos tratamentos foi realizada com base na reposição da evapotranspiração de referência (ET_0), calculada através da soma da ET_0 de dois dias anteriores ao dia do evento de irrigação. Nos dias de registro de precipitação, durante o ciclo da cultura, a mesma foi subtraída da ET_0 . Os tempos necessários para reposição das respectivas lâminas foram gravados no programador a fim de acionar e interromper o funcionamento do sistema de irrigação. Aos 20 dias antecedentes a maturidade fisiológica as lâminas de irrigação foram suspensas para todos os tratamentos.

A água utilizada apresentou qualidade C1-S1, com baixa salinidade e reduzida concentração de sódio, podendo ser usada para irrigação na maioria das culturas e quase todos os tipos de solos (RICHARDS, 1954).

5.1.2.6. Manejo da cultura

Logo após o plantio, foi aplicado 4,0 L ha^{-1} do herbicida seletivo pré-emergente Primestra Gold[®] (Syngenta Proteção de cultivos Ltda). A primeira adubação de cobertura ocorreu aos 22 DAP, utilizando-se 112 kg ha^{-1} de ureia (45% de N_2). Aos 25 DAP, para controle da Lagarta do Cartucho (*Spodoptera frugiperda* L.), aplicou-se 150 mL ha^{-1} do inseticida Karatê Zeon 50 CS[®] (Syngenta Proteção de cultivos Ltda). Completados 30 DAP foi aplicado 0,5 L por 100 L d'água do herbicida Roundup Original[®] (Monsanto do Brasil Ltda) para controle de ervas daninhas com jato dirigido nas entrelinhas de plantio. A segunda adubação de cobertura se deu aos 54 DAP, aplicando-se 112 kg ha^{-1} de ureia (45% de N_2). Para E_1 e E_2 , no período compreendido entre 35 e 45 DAP, alguns insetos

como: marimbombos, mosca varejeira (*Dermatobia hominis*), serra pau (*Oncideres impluviata*) surgiram na área experimental e foram controlados com uma aplicação do inseticida Connect® (Bayer S/A) na dosagem de 750 mL ha⁻¹.

5.1.2.7. Variáveis de crescimento e produção

Foram realizados registros de campo mensalmente para diâmetro do colmo, comprimento e largura da folha +3, número de folhas verdes e secas. Para observação das raízes foram abertas seis trincheiras (1,0x1,0x1,30 m) na E₂ durante a maturidade fisiológica. Ainda na E₂, quinzenalmente eram realizadas avaliações de massa seca pelo método destrutivo, separando folha, caule, pendão e espiga, acondicionando em saco de papel e colocadas para secar em estufa com ventilação forçada durante 72 horas a 65 °C.

O índice de área foliar (IAF) foi calculado da relação entre a área foliar e o espaço ocupado pelas plantas por metro quadrado em cada tratamento (BEADLE, 1993). A cobertura do dossel é estimada com base no IAF através da equação de Ritchie (RITCHIE, 1972; RITCHIE et al., 1985; BELMANS et al., 1983) e aplicado por Farahani et al. (2009) Equação 1:

$$CD = 1 - \exp(-K \cdot IAF) \quad (1)$$

em que, CD (%) é a cobertura do dossel e K, coeficiente de extinção. O valor adotado para o coeficiente de extinção é de 0,61 (SARMENTO, 2015).

No final do ciclo da cultura, a biomassa total e produtividade de grãos por parcela foi obtida colhendo-se as três linhas centrais, respectivamente, admitindo-se as duas linhas das extremidades como bordadura. Os valores da biomassa total e rendimento de grãos (13%) foram extrapolados e expressos em (kg ha⁻¹).

Transcorridos 120 DAP, finalizando a maturidade, a área útil colhida manualmente por parcela correspondeu às três linhas do interior da parcela, sendo três metros da linha central e 1,5 m das linhas laterais, admitindo-se as duas linhas das extremidades como bordadura. Os componentes de produção de milho foram expressos por meio das variáveis: massa de mil grãos (MMG g 1000 grãos⁻¹), número de espigas por parcela (NEP un parcela⁻¹), rendimento de grãos secos (RGS kg ha⁻¹), comprimento de espiga (CES cm espiga⁻¹), diâmetro de espiga (DES mm espiga⁻¹), número de linhas por espiga (NLE un espiga⁻¹), número de grãos por linha (NGL un linha⁻¹), número de grãos por espiga (NGE un espiga⁻¹), massa de grãos por espiga (MGE g espiga⁻¹), massa

de sabugo (MAS g sabugo⁻¹), massa de espiga despalhada (MED g espiga⁻¹) e massa de palhas (MPA g) de milho. Os valores da biomassa total e rendimento de grãos (13%) foram extrapolados e expressos em (kg ha⁻¹).

5.1.2.8. Descrição do AquaCrop®

O modelo AquaCrop® versão 5.0 (Outubro, 2015), desenvolvido pela FAO, é um modelo conduzido pela água para uso como ferramenta de apoio à decisão no planejamento e análise de cenários climáticos futuros (STEDUTO et al., 2009 e HSIAO et al., 2009). O modelo AquaCrop® relaciona seus componentes solo-cultura-atmosfera através do solo e seu balanço hídrico (ARAYA et al., 2010). Para simulação seis arquivos de entrada são utilizados: arquivo climático (temperatura mínima e máxima do ar, ET_o, precipitação e CO₂), arquivo de cultura (tempo de emergência, cobertura máxima do dossel, início da senescência e maturidade), arquivo de irrigação e condições iniciais da água do solo. Os arquivos de entrada são criados no Software Microsoft Office 2016 (Bloco de Notas e WordPad, versão: 1607). O modelo usa como padrão dados de concentração média anual de CO₂ do Observatório Mauna Loa, no Havaí, armazenados no subdiretório SIMUL.

O AquaCrop® utiliza cobertura do dossel (CD) em vez do índice de área foliar (IAF) como base para calcular a transpiração da cultura (Tr) e a evaporação do solo (E). A Tr está relacionada com a CD que é proporcional à extensão da cobertura do solo, enquanto que a evaporação é proporcional à área de solo descoberto (1-CD) (ARAYA et al., 2010). A CD é calculada a partir da transpiração diária, levando em consideração algumas características fisiológicas importantes da cultura, tais como: expansão foliar, desenvolvimento do dossel e senescência (STEDUTO et al., 2009 e ARAYA et al., 2010). A planta pode responder ao efeito do estresse hídrico com a senescência precoce da copa, fechamento dos estômatos e limitação da expansão do dossel expressos através de indicadores que variam de 0 (final da senescência) a 1 (início da senescência).

A produtividade normalizada da água da cultura (WP) é considerada constante para um determinado clima e cultura, podendo ser agrupada para as culturas C₃ entre 15 e 20 gm⁻² e 30 e 35 g m⁻² para C₄ (STEDUTO et al., 2009). O parâmetro WP no modelo é normalizado para tornar o modelo aplicável a diversos locais e estações, incluindo simulações climáticas futuras (STEDUTO et al., 2009 e HSIAO et al., 2009). O

rendimento de grãos (RG) é calculado como o produto da biomassa (B) e do índice de colheita (IC). Este último é simulado por um aumento linear com o tempo, desde a floração até a maturação fisiológica (STEDUTO et al., 2009).

O AquaCrop[®] simula de forma combinada efeitos do estresse de fertilidade juntamente com estresse hídrico sendo considerada como uma das vantagens do modelo, podendo ser calibrado para situações de deficiência completa (0%) a ausência nutricional (100%). Pragas e doenças não são considerados, constituindo limitação ao modelo (AKUMAGA et al., 2017).

5.1.2.9. Calibração do AquaCrop[®]

O AquaCrop[®] foi calibrado para o híbrido AG 7088 no Semiárido Alagoano para o ano de 2015 utilizando dados experimentais da primeira época de plantio (E₁), por apresentar condições climáticas favoráveis para maior expressividade do potencial produtivo da cultivar. Os resultados simulados de armazenamento de água no solo, cobertura do dossel e rendimento de biomassa e grãos foram comparados com os resultados observados para cada tratamento aplicado para as duas épocas de plantio, respectivamente. A diferença entre os resultados simulados e observados foram minimizados usando o método de tentativa e erro, no qual uma variável de entrada específica foi escolhida como a variável de referência e ajustando apenas aqueles parâmetros que eram conhecidos por influenciar no resultado da referida variável. O procedimento é repetido para chegar à correspondência mais próxima entre o modelo simulado e o valor observado para cada combinação de tratamento. Para tanto, foram utilizados os dados de entrada do modelo descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Descrições dos dados de entrada da cultura do milho usados no AquaCrop® para simulação no semiárido em Pão de Açúcar, AL, 2015.

Descrição dos parâmetros de entrada	Valores		Unidades
	Padrão	Calibrado	
Temperatura base	8,0	10,0	°C
Temperatura máxima	30,0	30,0	°C
Cobertura do dossel após a semeadura com 90% de emergência (CD ₀)	0,49	0,41	%
Coefficiente de crescimento do dossel (CCD)	16,3	17,4	% dia ⁻¹
Coefficiente de declínio do dossel (CDD) até a senescência	11,7	12,8	% dia ⁻¹
Profundidade máxima efetiva da raiz	2,3	0,6	m
Produtividade de água	33,7	31,0	g m ⁻²
Tempo da semeadura até a emergência	6,0	5,0	dias
Tempo da semeadura até o início do florescimento	66,0	70,0	dias
Tempo da semeadura até o início da senescência	107,0	110,0	dias
Tempo da semeadura até a maturidade	132,0	122,0	dias
Duração do florescimento	13,0	10,0	dias
Número de plantas	75.000	62.500	plantas ha ⁻¹
Índice de colheita médio para a primeira época experimental (E ₁)	48,00	45,00	%
Índice de colheita médio para a segunda época experimental (E ₂)	48,00	35,00	%

5.1.2.10. Parâmetros da cultura

O arquivo de cultura no AquaCrop® apresentam parâmetros específicos da cultura pertencentes a 13 estádios de crescimento fenológico com desenvolvimento de copa, raízes, evapotranspiração, água, fertilidade e temperatura (STEDUTO et al., 2009). A partir do Menu principal (Main menu) o usuário tem acesso à base de dados onde os arquivos estão armazenados e sub-divididos no macroambiente cultura e meio ambiente (clima, cultura, irrigação, campo, perfil do solo e lençol freático) e macroambiente simulação (período de simulação, condições iniciais, fora da estação e projetos).

Os valores de calibração para o desenvolvimento da cobertura do dossel do híbrido AG 7088 foram determinados por seis parâmetros e caracterizados pelo coeficiente de crescimento do dossel (CCD-17,4% dia⁻¹), que controla a taxa na qual o dossel se expande, coeficiente de declínio do dossel (CDD-12,8% dia⁻¹), que controla a velocidade com que o dossel senesce no final da estação de crescimento, cobertura máxima do dossel (CD_x-96%), 5 dias para emergência, 110 dias até senescência e 122 dias até a maturidade

final. Comparou-se a biomassa e o rendimento de grãos com os dados medidos utilizando a produtividade normalizada da água (WP) e o índice de colheita (IC).

O período de crescimento reprodutivo consiste nos estádios de floração, formação de rendimento e índice de colheita (IC). Estes são controlados por dias para floração (70 DAP), período de floração (10 dias) e dias para início da colheita (42 dias). O estágio de floração foi desencadeado para começar quando a cultura atinge a cobertura máxima do dossel. O início da floração inicia na metade do estágio da CD_x , quando o mesmo é atingido, após o qual cessa a expansão do dossel.

A profundidade efetiva do sistema radicular foi estabelecida em 0,6 m com profundidade máxima obtida durante o período de floração. O coeficiente máximo de transpiração (K_{cb_x}) foi calibrado para padronizar ET_o durante a estação de crescimento, onde o CD era igual à cobertura máxima do dossel (CD_x). O valor (K_{cb_x}) assim obtido foi de 1,05 sob irrigação total e sem estresse de nutrientes.

O valor calibrado de WP foi obtido como $32,1 \text{ g m}^{-2}$. O estresse hídrico para expansão do dossel fora calibrado para limite superior, limite inferior e fator forma em 0,14, 0,72 e 2,9, respectivamente. Além disso, para o estresse estomático, o limite superior e o fator forma foram 0,69 e 6,0, respectivamente, enquanto o limite inferior foi fixado no ponto de murcha permanente (PMP). Todavia, para o estresse promovendo a senescência precoce, o limite superior e o fator forma foram 0,69 e 2,7, respectivamente, enquanto o limite inferior foi fixado no PMP. Todos esses oito coeficientes calibrados foram relacionados à função de estresse hídrico da cultura no modelo AquaCrop[®], que foi utilizado para simular o rendimento dos diferentes tratamentos aplicados no experimento.

5.1.2.11. Manejo da irrigação

O modelo AquaCrop[®] disponibiliza opções específicas para que o usuário simule a irrigação, como determinar a necessidade de irrigação líquida, a geração de cronograma de irrigação baseado em estratégias de manejo irrigado ou sequeiro. A opção para programação de irrigação fornece diferentes alternativas para os diversos métodos de aplicação como: irrigação por aspersão, irrigação superficial (bacia, sulco e inundação) e irrigação por gotejamento. A principal diferença entre os métodos de aplicação é a porção da superfície molhada durante a irrigação. No presente estudo, o experimento foi

conduzido com irrigação por gotejamento com área molhada de 30%. Um cronograma de irrigação foi introduzido diretamente no modelo especificando quando (número de dias), profundidade (lâmina aplicada, mm) e qualidade da água (dS m^{-1}).

5.1.2.12. Manejo de campo

Para os arquivos de manejo de campo como fertilidade do solo, resíduos de colheita e práticas de superfície, estes parâmetros não foram considerados, uma vez que estas práticas foram desativadas para calibração do modelo. As características do perfil do solo para dois horizontes (0,00-0,30 e 0,30-0,60 m), com classificação textural franco-arenosa, para ambos os horizontes. O PMP nas profundidades 0,00-0,30 e 0,30-0,60 m corresponderam a 6,4 e 6,5%, respectivamente. Enquanto que a capacidade de campo (CC) para as camadas de 0,00-0,30 e 0,30-0,60 m, foram 22,6 e 26,5%. A saturação do solo (Sat.), capacidade de água disponível (CAD), condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e coeficiente de saturação (tau) de 0,00-0,30 m foram 48,1%, 162 mm m^{-1} , $883,9 \text{ mm dia}^{-1}$, 0,93. E as mesmas variáveis de 0,30-0,60 m foram 47,8%, 200 mm m^{-1} , $1481,3 \text{ mm dia}^{-1}$, 1,00. O escoamento superficial com curva número de 65 e água facilmente evaporável de 9,0 mm na camada superficial de 0,04 m. Não foi considerada a camada restritiva para impedimento do desenvolvimento radicular e presença de lençol freático.

5.1.2.13. Acurácia e performance do modelo

O desempenho do modelo foi avaliado utilizando-se como parâmetros estatísticos o erro médio quadrático (RMSE), a normal do erro médio quadrático (nRMSE), o índice de concordância (d) de Willmont (1981), o coeficiente de correlação (r) e o desvio percentual, conforme as seguintes equações:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2} \quad (2)$$

$$nRMSE = \left[\sum_{i=1}^N \frac{(S_i - M_i)^2}{N} \right]^{0.5} \times \frac{100}{M} \quad (3)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S'_i| + |M'_i|)^2} \right] \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum S_i M_i - \frac{\sum S_i \sum M_i}{N}}{(N-1)S_{Si}S_{Mi}} \quad (5)$$

$$\text{Desvio percentual} = (S_i - M_i) \times \frac{100}{M_i} \quad (6)$$

em que; S_i , indica valores simulados e M_i , valores medidos; e N , número de observações para todos os índices estatísticos.

O erro médio quadrático (*RMSE*, Eq. [2]) mensura a performance geral do modelo e sintetiza a diferença média entre os valores observados e estimados. A unidade é a mesma utilizada entre as variáveis observadas e estimadas, portanto, quanto mais próximo o valor se aproximar de zero, melhor será o desempenho do modelo (LOAGUE & GREEN, 1991).

A normal do erro médio quadrático (*nRMSE*, Eq. [3]) calculado como descrito por Loague & Green (1991), dá uma medida (%) da diferença relativa de dados simulados versus observados, onde M é a média da variável observada. A simulação é considerada excelente quando a *nRMSE* é inferior a 10%, bom quando superior a 10% e inferior a 20%, justo se superior a 20% e inferior a 30% e pobre se for superior a 30% (Jamieson et al., 1991).

O índice de concordância (d , Eq. [4]) expressa a exatidão dos valores estimados em relação aos observados, variando de zero, que indica nulidade, a 1 que indica perfeita exatidão, em que, S'_i é o valor estimado, menos a média da variável observada; M'_i é o valor observado, menos a média da variável observada.

O coeficiente de correlação de Pearson (r , Eq. [5]) expressa o grau de associação linear entre duas variáveis aleatórias, ou seja, indica até que ponto os valores de uma variável estão relacionados com os valores de outra variável. A correlação pode ser denominada positiva ou negativa (RODRIGUES, 2008). O desvio padrão das variáveis é representado por S_{S_i} e S_{M_i} , respectivamente. Os valores do coeficiente de correlação segundo Dancey & Reidy (2013), podem ser classificados conforme os intervalos, em que: $r = |0,10|$ até $|0,30|$ (fraca); $r = |0,40|$ até $|0,6|$ (moderada); $r = |0,70|$ até $|1,00|$ (forte)

5.1.3. Resultados

A Figura 3 mostra os resultados da simulação para o total de água no solo (0-60 cm) na primeira época (E_1) de cultivo do híbrido AG 7088 no semiárido de Alagoas. Os valores simulados, bem como os medidos, respondem bem ao abastecimento de água no solo (irrigação e precipitação) para as lâminas de L_1 a L_4 e L_6 seguindo a tendência dos

valores observados com subestimativa compreendida entre 24 a 35 DAP e 99 DAP até a maturidade fisiológica, exceto para L₅, em que o modelo subestimou os resultados simulados para todo ciclo da cultura. Todavia, o teor de água no solo simulado permaneceu acima do ponto de murcha permanente (PMP) para os seis tratamentos durante a época de cultivo, enquanto algumas observações (L₃, L₄, L₅ e L₆) registraram valores superiores a capacidade de campo (CC).

As estatísticas de desempenho do modelo para os tratamentos com lâminas de irrigação mostram simulações com alta concordância de L₁ a L₄ quando comparados aos valores observados, com d variando de 0,75 a 0,90. As lâminas L₅ e L₆ apresentaram menores concordâncias com valores de d iguais a 0,54 e 0,67, respectivamente. De acordo com Dancey & Reidy (2013) a correlação é considerada forte para as lâminas L₁, L₂, L₃ e L₅ com $0,76 \leq r \leq 0,83$ e moderado para L₄ ($r=0,59$) e L₆ ($r=0,60$). O RMSE variou de 4,68 a 19,33 mm, correspondentes a 3,5 e 13% do armazenamento total de água no solo. A performance geral do modelo AquaCrop[®] é classificada como boa, com $10,97\% \leq \text{nRMSE} \leq 16,71\%$ para as lâminas L₁ a L₄, e excelente para L₆ ($\text{nRMSE}=3,44\%$) e L₅ ($\text{nRMSE}=3,81\%$), Jamieson et al. (1991).

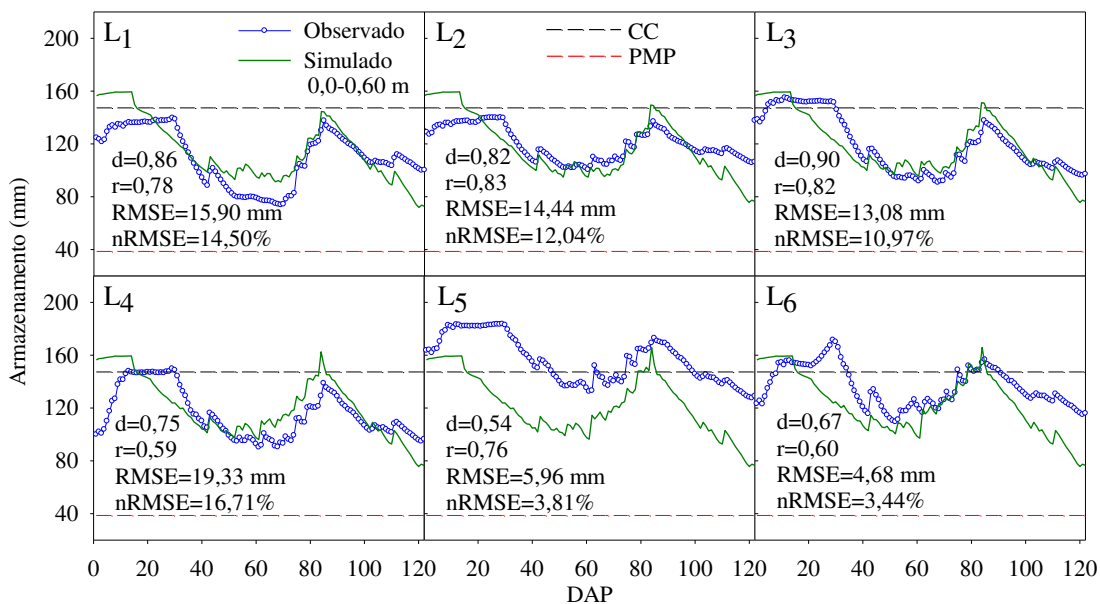


Figura 3. Total de água no solo observado e simulado na camada de 0,0-0,60 m para estação de crescimento do milho na primeira época (E₁) experimental no semiárido Alagoano. L: lâmina de irrigação.

A Figura 4 apresenta o armazenamento de água no solo observado e simulado na camada de 0,0-0,60 m durante a segunda época (E_2) em Pão de Açúcar, AL. A exatidão dos valores estimados em relação aos observados foi baixa, tanto na lâmina L_1 ($d=0,38$) quanto na L_3 ($d=0,48$). Em sentido complementar, a correlação entre os valores simulados e observados foi classificada como forte ($r=0,87$) na L_1 e fraca ($r=0,30$) para L_3 . Valores de RMSE para L_1 (26,0 mm) e L_2 (51,95 mm) representam 17 e 34% do total de água no solo, respectivamente. A performance do AquaCrop[®] é razoável para a L_1 e considerada pobre para L_2 . Salienta-se que esta foi classificada, como pobre (NRMSE > 30%) nas lâminas L_1 e L_3 . Para a lâmina de estresse hídrico (L_1) os valores simulados e medidos. Aos 29 DAP as hastes do TDR foram retiradas dos tratamentos L_2 , L_4 , L_5 e L_6 impossibilitando a simulação completa do conteúdo de água no solo durante o ciclo da cultura. A lâmina 3, apresentou comportamento anômalo, com distorções elevadas comparadas as medições observadas, todavia, a simulação segue tendência real de campo, uma vez que L_3 correspondeu a 100% da reposição das perdas por evapotranspiração.

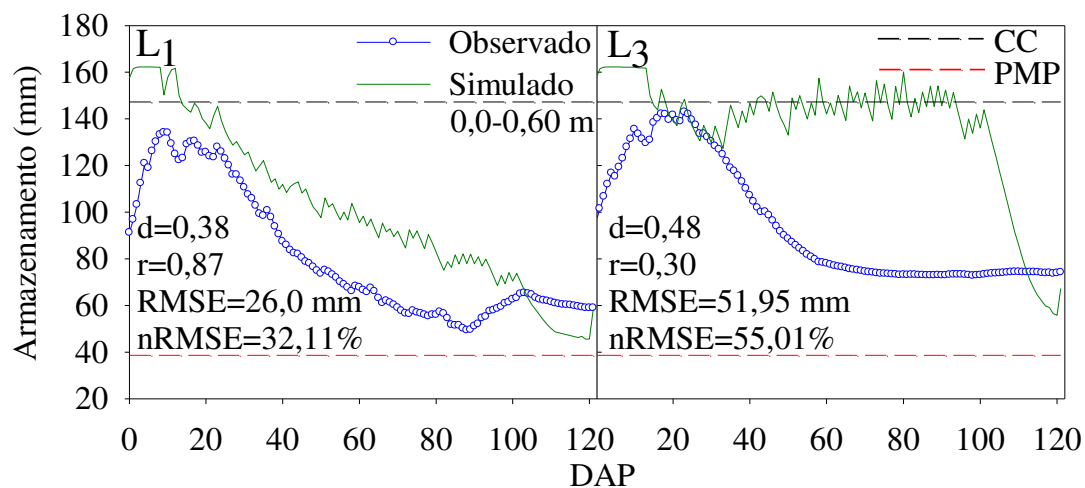


Figura 4. Armazenamento de água no solo observado e simulado na camada de 0,0-0,60 m durante o ciclo do milho na segunda época experimental em Pão de Açúcar, AL. L: lâmina de irrigação.

A Figura 5 mostra a comparação entre a cobertura do dossel observado e simulado, para duas épocas de plantio (E_1 e E_2) do híbrido AG 7088 irrigado no semiárido Alagoano. O coeficiente de determinação (R^2) estão próximos de 1 para todos os tratamentos da E_1 . Todavia, para E_2 os valores de R^2 variaram entre 0,83 a 0,98 indicando boa correlação. Os resultados estatísticos para E_1 estão compreendidos para d (0,96-0,98), r (0,99-1,0) e

RMSE (0,11-0,13%). A performance do modelo é boa com $15,3 < nRMSE < 17,5\%$. Valores de R^2 para E_2 variou de 0,83 a 0,98. Os índices estatísticos variaram para d (0,93-0,99), r (0,91 a 0,99) e RMSE (0,06-0,16). A performance para L_6 foi classificada como excelente ($nRMSE=8,3\%$), as lâminas L_2 , L_4 e L_5 , boa ($10,2 < nRMSE < 15,0\%$) e fraco para L_1 e L_3 ($20,3 < nRMSE < 25,7\%$). O melhor ajuste entre os valores simulados e observados está na E_1 , pois, para E_2 registraram-se maior dispersão entre valores estimados e medidos.

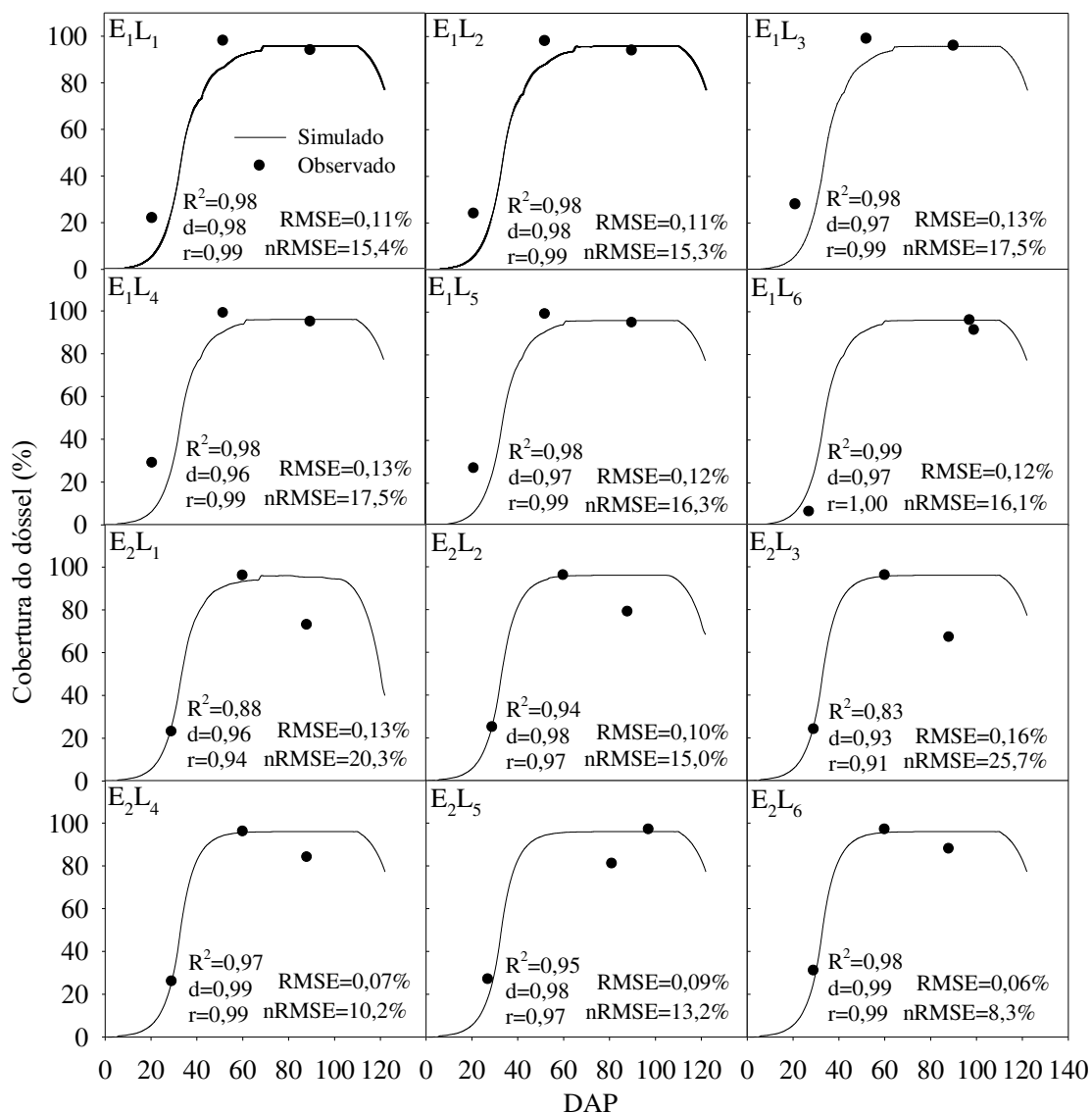


Figura 5. Cobertura do dossel observado (pontos) e simulado (linha sólida), para duas épocas de plantio (E_1 e E_2) do híbrido AG 7088 irrigado no semiárido Alagoano, 2015.

Os resultados da simulação para as duas épocas de plantio (DAP), utilizando os dados de calibração da biomassa e rendimento de grão do milho, são apresentados na Tabela 3. Verificou-se boa relação entre valores medidos e simulados pelo modelo AquaCrop®, os desvios para rendimento de grãos e biomassa acumulada para E₁ variou entre 8,36% (L₆) a 6,64% (L₄). Como o índice de colheita (IC) é obtido pela divisão do rendimento de grãos pela biomassa acumulada, valores para E₁ ficaram entre 40,3 a 48,3%. A E₂ registrou desvio de biomassa acumulada (-19,22 a 8,50%) e rendimento de grãos (-21,50 a 8,50), os IC ficaram compreendidos entre 26,2 a 49,3%. A primeira época de plantio foi ideal para que a capacidade produtiva de biomassa e rendimento de grãos do híbrido AG 7088 fosse beneficiado pelas condições agroclimáticas (temperatura, umidade relativa do ar, radiação). Enquanto, para E₂, o cultivo ficou compreendido no período seco, sendo influenciado negativamente pelas condições adversas do clima afetando sobremaneira o potencial produtivo.

Tabela 3. Índice de colheita, biomassa acumulada, rendimento de grãos simulados e observados e desvio percentual (%) para o milho em duas épocas de plantio para seis lâminas de irrigação em Pão de Açúcar, AL, 2015.

Épocas	Tratamentos	Biomassa (kg ha ⁻¹)			Rendimento de grãos (kg ha ⁻¹)			IC
		Lâminas ¹	Observado	Simulado	Desvio %	Observado	Simulado	
Época 1	L ₁	26.452	25.758,0	-2,69	11.950,0	11.624,0	-2,80	45,2
	L ₂	25.503	26.021,0	1,99	11.730,0	11.993,0	2,19	46,1
	L ₃	26.877	26.275,0	-2,29	12.490,0	12.106,	-3,17	46,5
	L ₄	24.554	26.479,0	7,27	11.870,0	12.714,0	6,64	48,3
	L ₅	28.466	26.689,0	6,66	11.470,0	10.676,0	-7,44	40,3
	L ₆	28.811	26.741,0	1,08	12.750,0	11.766,0	-8,36	44,3
Época 2	L ₁	18.065	15.153,0	-19,22	4.730,0	3.893,0	-21,50	26,2
	L ₂	18.673	20.409,0	8,50	5.520,0	6.033,0	8,50	30,0
	L ₃	22.965	23.964,0	4,17	6.630,0	6.946,0	4,55	28,9
	L ₄	22.180	24.096,0	7,95	10.930,0	11.807,0	7,43	49,3
	L ₅	22.993	24.119,0	4,67	9.290,0	9.647,0	3,70	40,0
	L ₆	26.054	24.124,0	-8,00	8.870,0	8.202,0	-8,14	34,0

¹: Lâmina efetiva; IC: índice de colheita percentual.

A Figura 6, observa-se, em geral, estreita relação entre os valores de biomassa observados e simulados pelo AquaCrop[®], sobretudo aos 36 DAP quando as retas se sobrepõem. Em caráter majoritário, o modelo subestima o acúmulo de biomassa no intervalo de tempo compreendido entre 49 e 108 DAP. Exceto na lâmina L₆, onde ocorreu maior dispersão entre valores observados e simulados. O modelo superestima a biomassa acumulada no período de colheita aos 122 DAP, embora exista expressiva aproximação entre os valores.

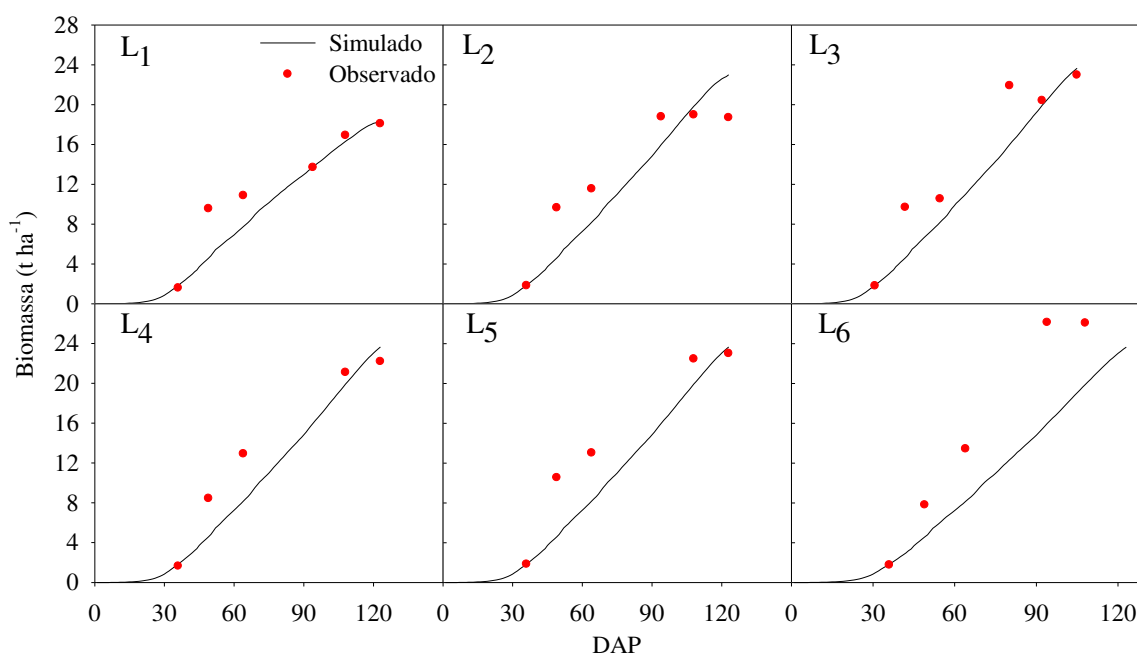


Figura 6. Acúmulo de biomassa observada e simulada acima do solo para a cultura do milho na segunda época experimental em Pão de Açúcar, AL, 2015.

A Figura 7 mostra a relação linear (linha 1:1) da biomassa observada e simulada na segunda época de plantio. Para todas as lâminas de irrigação aplicadas, o coeficiente angular do ajuste de regressão entre a biomassa observada e acumulada evidenciou inclinação significativa ($p < 0,01$), com elevada precisão dos modelos ratificada pelos coeficientes de determinação (R^2) que variaram entre 80 e 93.

Os resultados finais do AquaCrop[®] para biomassa acima do solo na linha 1:1, apresentam resultados de índice de concordância (d) acima de 0,95 e RMSE variando de 2,00 a 3,92 t ha⁻¹. A classificação do AquaCrop[®] quanto a sua performance de acúmulo de biomassa acima do solo é considerada boa para L₄ (nRMSE=16,5 t ha⁻¹), razoável para

L₂ (nRMSE=25,0 t ha⁻¹), L₃ (nRMSE=22,8 t ha⁻¹) e L₅ (nRMSE=24,5 t ha⁻¹) e pobre para L₁ (nRMSE=30,0 t ha⁻¹).

Todavia, de acordo com a inclinação da reta (1:1) o modelo superestima os resultados de biomassa simulada comparada a biomassa observados para as lâminas L₂ (12%) e L₃ (4%). As lâminas 1, 4, 5 e 6 são subestimadas em 7%, 7%, 5%, e 30%, respectivamente.

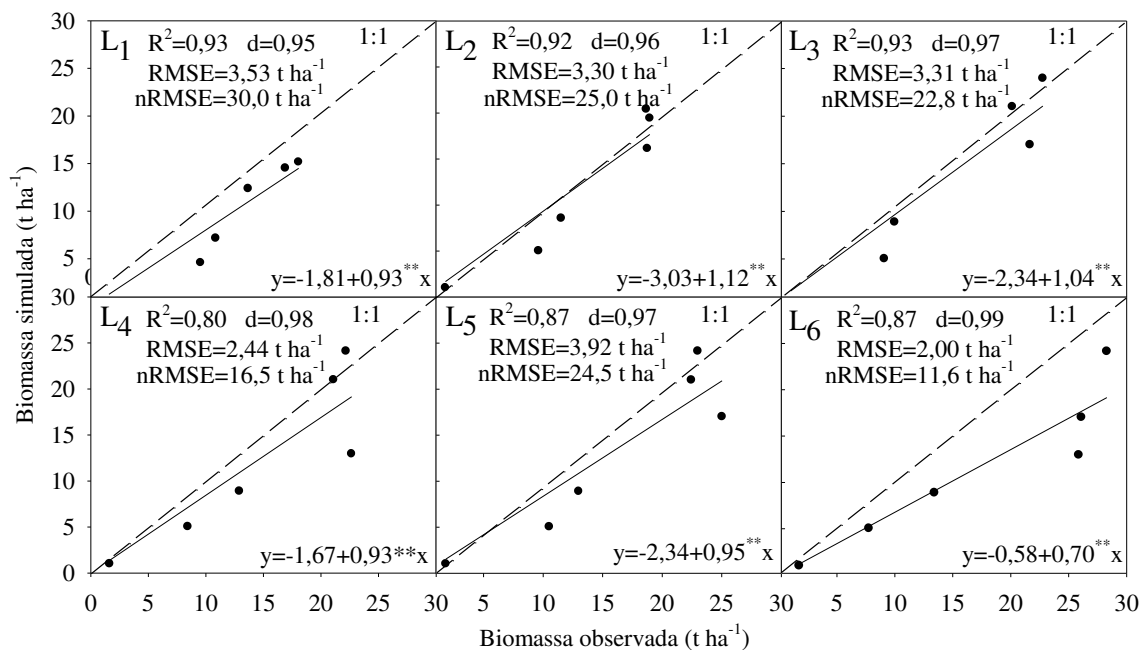


Figura 7. Relação linear (linha 1:1) da biomassa observada e simulada acima do solo para a cultura do milho na segunda época experimental em Pão de Açúcar, AL, 2015.

5.1.4. Discussão

A simulação do acúmulo de fitomassa, rendimento de grãos e armazenamento de água no solo no cultivo do milho híbrido AG 7088 irrigado introduz uma alternativa importante na tomada de decisões acerca do planejamento para novas safras, notadamente na região semiárida do Nordeste, onde os recursos hídricos são limitados no tempo e espaço (CIRILO et al., 2017), denotando a importância deste estudo para incremento de informações técnico-científicas ao estado da arte, de modo a alavancar o desenvolvimento local e permitir que os resultados possam ser parte integrante de estudos de validação do modelo AquaCrop[®] para a cultura do milho em nível regional (SANTOS et al., 2014).

Tanto Farahani et al. (2009) e Hussein et al. (2011) relataram que a AquaCrop[®] previu bem os ciclos de aplicação e evaporação de água no solo devido a eventos de irrigação, entretanto, tenderam a superestimar consistentemente o teor total de água no solo, particularmente nas parcelas de irrigação deficitária. De modo semelhante, Zeleke et al. (2011) relataram que o AquaCrop[®] superestimou ligeiramente o teor de água do solo da camada de raiz (0-100 cm) na maior parte do tempo durante a estação, mas respondeu bem a tendência. Todavia, a ligeira subestimação da água do solo com altos teores de água no solo pelo AquaCrop[®] foi provavelmente causada pelo modelo que não permite que o teor de água no solo permaneça acima da CC durante dias consecutivos (GERVAIS et al., 2010). O AquaCrop[®] como a maioria dos outros modelos de simulação de água no solo supõe que os solos saturados drenam para CC dentro de um curto período de tempo. Além disso, o AquaCrop[®] não tem um mecanismo para lidar com a entrada súbita de água no sistema, isto é, uma sub-rotina de ascensão capilar ainda não foi implementada (RAES et al., 2011).

De fato, os resultados deste trabalho representam avanço para o cultivo de milho no semiárido nordestino, o que se justifica pelo fato do modelo buscar o equilíbrio entre precisão, simplicidade e robustez, usando número relativamente pequeno de parâmetros explícitos e principalmente intuitivos e variáveis de entrada que exigem métodos simples para sua derivação. Contudo a capacidade do AquaCrop[®] para simular os rendimentos de diferentes culturas tem sido extensivamente testada por vários pesquisadores ao redor do mundo em diversos ambientes e todos têm relatado resultados positivos, por exemplo nas culturas da cevada (*Hodeum vulgare* L.) (ARAYA et al., 2010a), algodão (*Gossypium hirsutum* L.) (BAUMHARDT et al., 2009; HUSSEIN et al., 2011), quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) (GEERTS et al., 2009), milho (*Zea mays* L.) (HENG et al., 2009; HSIAO et al., 2009; ZINYENGERE et al., 2011; AKUMAGA et al., 2017), batata (*Solanum tuberosum* L.) (VANUYTRECHT et al., 2011), trigo (*Triticum aestivum* L.) (ANDARZIAN et al., 2011) e da canola (*Brassica napus* L.) (ZELEKE et al., 2011).

Os resultados supracitados evidenciem adequabilidade do modelo para as simulações, Mkhabela & Bullock (2012) reportam que o armazenamento de água no solo, corriqueiramente, é superestimado. Todavia, Ahmadi et al. (2015) esclarecem que não há uma tendência geral na simulação do teor de água do solo pelo AquaCrop[®], enfatizando que situações de superestimação e subestimação podem ocorrer. Com base nessas

informações, pode-se inferir que os resultados deste trabalho obedecem uma tendência geral, situando-se dentro do esperado para a variável em questão. De fato, os valores referentes a performance (RMSE), exatidão (d), correlação (r) obtidos do modelo, seguem uma tendência geral, com dados compreendidos dentro dos intervalos descritos na literatura pertinente ao AquaCrop[®] e a outros modelos correlatos (ANDARZIAN et al., 2011; BRIMELow et al., 2010; GERVAIS et al., 2010; KERSEBAUM et al., 2008; LIU et al., 2011; MKHABELA & PAUL, 2012).

Nesta pesquisa, a dispersão entre os valores observados e simulados são decorrentes da variação das lâminas de irrigação, o que também foi verificado por Iqbal et al. (2014) ao relatarem que o modelo tende a superestimar os valores armazenamento de água em condições de déficit hídrico severo. Pesquisas reforçam os indícios de superestimação do modelo em condições de déficit hídrico (FARAHANI et al., 2009; HUSSEIN et al., 2011), sendo este fato mais acentuado no período de colheita, Zeleke et al. (2011), com valores simulados de água armazenada chegando a 80 mm a mais que os observados (HSIAO et al., 2009). Devido à combinação entre os conjuntos de dados medidos e simulados, Araya et al. (2010b) verificou a subestimação do conteúdo de água no solo simulado pelo modelo AquaCrop[®] sob condições de estresse hídrico severo.

Por ocorrer boa relação entre os valores de rendimento de grãos e biomassa observados e simulados, com desvios dentro da normalidade, os desvios mais expressivos conduziram a subestimação dessas variáveis pelo modelo podendo ser explicada pelo volume reduzido de água aplicado via irrigação no tratamento correspondente à lâmina 1, da segunda época experimental. Isso ocorreu pelo fato do déficit hídrico severo ter restringido o desenvolvimento radicular, limitando a exploração de camadas mais profundas do solo, refletindo em menor absorção de água. Essa informação é ratificada por Iqbal et al. (2014) que relataram desvios percentuais baixos com suplementação hídrica adequada via irrigação, enquanto que sob cultivo de sequeiro houve abrupta subestimação do rendimento de grãos com desvio expressivo (-43,2%), sendo esse fato atribuído à escassez hídrica severa no solo.

Situações de elevados desvio percentuais são recorrentes na literatura pertinente à modelagem com o AquaCrop[®] (HENG et al., 2009; ARAYA et al., 2010a; ARAYA et al., 2010b; ZELEKE et al., 2011; ABEDINPOUR et al., 2012), sobretudo em cultivos conduzidos sob limitação severa de água no solo e sob sequeiro quando comparado a

cultivos com manejo da irrigação eficiente e bom suprimento hídrico para as culturas de milho, teff, canola e trigo de inverno (IQBAL et al., 2014). Estes autores reportam que aumentos de desvio percentual estão relacionados com o fato do déficit hídrico acelerar a senescência foliar, refletindo em menor ciclo da cultura e conseqüente redução no acúmulo de fotoassimilados, ocasionando menor translocação destes compostos para os grãos.

Os resultados de relação entre biomassa simulada e acumulada apresentaram boa performance do modelo com baixa RMSE e alto R^2 , em consonância com resultados observados por Ahmadi et al. (2015) que encontraram RMSE de 2,48 t ha⁻¹ para calibração e 2,71 t ha⁻¹ para validação com a cultura do milho. Valores similares (RMSE=3,83 t ha⁻¹) também foram relatados por Paredes et al. (2014), sob déficit de irrigação e por Nyakudya & Stroosnijder (2014), que encontraram RMSE de 2,00 t ha⁻¹ sob condições de sequeiro.

Os resultados do modelo AquaCrop[®] podem ser comparados com outros modelos de culturas utilizados na planície do Norte da China para previsão do rendimento do trigo de inverno e estratégias de manejo da água. Por exemplo, Lu & Fan (2012) usaram o modelo EPIC para a análise de rendimento em trigo de inverno, com um RMSE variando entre 0,84 e 3,60 Mg ha⁻¹.

Em linhas gerais, Ahmadi et al. (2015) sugerem que nas próximas versões do AquaCrop[®] sejam necessárias modificações e revisões nas equações básicas de desenvolvimento e crescimento das culturas para preencher as lacunas atuais. Na revisão das principais equações, os autores recomendam levar em conta as possíveis interações entre os níveis de irrigação, potenciais de água no solo, componentes de água no solo, transpiração e fertilidade do solo que afetam o desenvolvimento do dossel, comportamento, produção e senescência foliar, conforme destacam Paredes et al. (2014), Shrestha et al. (2013) e Ahmadi et al. (2011a, b). A este respeito, alguns estudos salientam a importância da modificação precisa dos parâmetros de crescimento da cultura para aumentar o desempenho do modelo (TODOROVIC et al., 2009; ZELEKE et al., 2011).

5.1.5. Conclusões

O modelo AquaCrop/FAO[®] foi calibrado para a cultura do milho híbrido AG 7088 cultivado sob lâminas de irrigação nas condições agroclimáticas de Pão de Açúcar no

semiárido Alagoano, evidenciando boa performance do modelo entre valores observados e simulados, de modo a subsidiar tomadas de decisões acerca de estratégias de cultivo nas safras futuras;

Para as duas épocas de plantio (E_1 e E_2) o armazenamento de água no solo é modelado pelo AquaCrop/FAO[®] de maneira satisfatória, exceto para a lâmina 5 (E_1), onde o modelo subestimou o total de água no solo para todo ciclo da cultura, evidenciando a deficiência do modelo em estimar o conteúdo de água no solo sobre condições de déficit hídrico;

A simulação da biomassa acumulada e rendimento de grãos para E_1 apresentou desvios moderados entre os tratamentos para o híbrido AG 7088. Para E_2 , a lâmina 1 subestimou o rendimento de grãos e a biomassa acumulada em -21,50% e -19,22%, respectivamente, indicando que para situações de estresse hídrico o modelo precisa ser melhor calibrado.

5.1.6. Referências

ABEDINPOUR, M.; SARANGI, A.; RAJPUT, T. B. S.; MAN, S.; PATHAK, H.; AHMAD, T. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 110, p. 55-66, 2012.

AHMADI, S. H.; MOSALLAEPOUR, E.; KAMGAR-HAGHIGHI, A. A.; SEPASKHAH, A. R. Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements. **Water Resources Management**, v. 29, n. 8, p. 2837-2853, 2015.

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, n. 1, p. 225-234, 2017.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements**. Irrig. and Drainage Paper n° 56. Rome: FAO, 1998. 300 p.

ANDARZIAN, B.; BANNAYAN, M.; STEDUTO, P.; MAZRAEH, H.; BARATI, M. E.; BARATI, M. A.; RAHNAMA, A. Validation and testing of the AquaCrop model under

full and deficit irrigated wheat production in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 100, n. 1, p. 1-8, 2011.

ARAYA, A.; HABTU, S.; HADGU, K. M.; KEBEDE, A.; DEJENE, T. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 11, p. 1838-1846, 2010a.

ARAYA, A.; KEESSTRA, S. D.; STROOSNIJDER, L. Simulating yield response to water of Teff (*Eragrostis tef*) with FAO's AquaCrop model. **Field Crops Research**, v. 116, n. 1-2, p. 196-204, 2010b.

BARROS, A. H. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SILVA, A. B.; SANTIAGO, G. A. C. F. **Climatologia do Estado de Alagoas**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Recife: Embrapa Solos, 2012. 32 p.

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**, v. 101, n. 3, p. 460-468, 2009.

BEADLE, C. L. Growth analysis. In: HALL, D. O.; SCURLOCK, J. M. O.; BOLHÀRNORDENKAMPF, H. R.; et al. **Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual**. London : Chapman & Hall. p.36-46, 1993.

BELMANS, C.; WESSELING, J. G.; FEDDES, R. A. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. **Journal of Hydraulic**, v. 63, n. 3, p. 271-286, 1983.

BINDI, M.; SINCLAIR, T. R.; HARRISON, J. Analysis of seed growth by linear increase in harvest index. **Crop Science**, v. 39, n. 2, p. 486-493, 1999.

BRIMELOW, J. C.; HANESIAK, J. M.; RADDATZ, R. Validation of soil moisture simulations from the PAMII model and an assessment of their sensitivity to uncertainties in soil hydraulic parameters. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 1, p. 100-114, 2010.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia**. Porto Alegre: Artmed, 2013. 608 p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield Response to Water**. FAO Irrigation and Drainage paper N° 33. Rome: FAO, 1979. 193p.

FAO. **AquaCrop: The FAO Crop-Model to Simulate Yield Response to Water**. 2009. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>. Acesso em 02 de novembro de 2016.

FARAHANI, R. Z.; HEKMATFAR, M. **Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies**. Springer Science & Business Media, 2009. 549 p.

FERRIS, R.; WHEELER, T. R.; ELLIS, R. H.; HADLEY, P. Seed yield after environmental stress in soybean grown under elevated CO₂. **Crop Science**, v. 39, n. 3, p. 710-718, 1999.

GEERTS, S.; RAES, D.; GARCIA, M.; MIRANDA, R.; CUSICANQUI, J. A.; TABOADA, C.; MENDOZA, J.; HUANCA, R.; MAMANI, A.; CONDORI, O.; MAMANI, J.; MORALES, B.; OSCO, V.; STEDUTO, P. Simulating yield response of Quinoa to water availability with AquaCrop. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 499-508, 2009.

HENG, L. K.; HSIAO, T.; EVETT, S.; HOWELL, T.; STEDUTO, P. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 488-498, 2009.

HSIAO, T. C.; HENG, L.; STEDUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop - the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 448-459, 2009.

HUSSEIN, F.; JANAT, M.; YAKOUB, A. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 4, p. 1319-1330, 2011.

IQBAL, M. A.; SHEN, Y.; STRICEVIC, R.; PEI, H.; SUN, H.; AMIRI, E.; del RIO, S. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. **Agricultural Water Management**, v. 135, p. 61-72, 2014.

JAMIESON, P. D.; PORTER, J. R.; WILSON, D. R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. **Field Crops Research**, v. 27, n. 4, p. 337-350, 1991.

KENNEDY, J. W.; RITCHIE, J. L.; DAVIS, K. B.; STADIUS, M. L.; MAYNARD, C.; FRITZ, J. K. The Western Washington randomized trial of intracoronary streptokinase in acute myocardial infarction: a 12-month follow-up report. **New England Journal of Medicine**, v. 312, n. 17, p. 1073-1078, 1985.

KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra: Fondo de Cultura Económica**. México: Editora, 1948. 479 p.

LIU, H. L.; YANG, J. Y.; TAN, C. S.; DRURY, C. F.; REYNOLDS, W. D.; ZHANG, T. Q.; BAI, Y. L.; JIN, J.; HE, P.; HOOGANBOOM, G. Simulating water content crop yield and nitrate-N loss under free and controlled tile drainage with subsurface irrigation using the DSSAT model. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 1105-1111, 2011.

LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 7, n. 1, p. 51-73, 1991.

MKHABELA, M. S.; BULLOCK, P. R. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. **Agricultural Water Management**, v. 110, p. 16-24, 2012.

MOOT, D. J.; JAMIENSON, P. D.; HENDERSON, A. L.; FORD, M. A.; PORTER, J. R. Rate of change in harvest index during grain-filling of wheat. **Journal of Agricultural Science**, v. 126, n. 4, p. 387-395, 1996.

NYAKUDYAA, I. W.; STROOSNIJDER, L. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: modelling with AquaCrop. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 280-296, 2014.

PAREDES, P.; MELO-ABREU, J. P.; ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under

full and deficit irrigation with focus on model parameterization. **Agricultural Water Management**, v. 144, p. 81-97, 2014.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington, U. S. Salinity Laboratory. USDA. Agriculture handbook, 1954. 60 p.

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, 1972.

ROCHA, A. E. Q.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; MEDEIROS, R. P.; TEODORO, I. Conteúdo de água no solo por reflectometria no domínio do tempo e balanço de água no solo em cultivo de milho. **Revista IRRIGA**, v. 19, n. 2, p. 267-278, 2014.

RODRIGUES, W. C. **Apostila Estatística Aplicada**. 6ª Ed. Revisada e Ampliada, 2010. 70 p. Rio de Janeiro. Disponível em: < http://wcrodrigues.ebras.bio.br/aulas/estat_ambiental_2010.pdf >. Acesso em 02 de novembro de 2016.

SANTOS, W. O.; SOBRINHO, J. E.; MEDEIROS, J. F.; MOURA, M. S. B.; NUNES, R. L. C. Coeficientes de cultivo e necessidades hídricas da cultura do milho verde nas condições do semiárido brasileiro. **Revista IRRIGA**, v. 19, n. 4, p. 559-572, 2014.

SARMENTO, P. L. V. S. **Ecofisiologia do milho sob diferentes épocas de semeadura e densidades de plantio**. 2015. 121 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas.

SHRESTHA, N.; RAES, D.; VANUYTRECHT, E.; KUMAR SAH, S. H. Cereal yield stabilization in Terai (Nepal) by water and soil fertility management modeling. **Agricultural Water Management**, v. 122, p. 53-62, 2013.

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.

TODOROVIC, K. T.; LUCKETT, D.; COWLEY, R. Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 6, p. 1610-1618, 2011.

TODOROVIC, M.; ALBRIZIO, R.; ZIROTIC, L.; ABI SAAB, M. T.; STOCKLE, C.; STEDUTO, P. Assessment of AquaCrop, Cropsyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 509–521, 2009.

VANUYTRECHT, E.; RAES, D.; WILLEMS, P. Considering sink strength to model crop production under elevated atmospheric CO₂. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 12, p. 1753-1762, 2011.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

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.

ZINYENGERE, N.; MHIZHA, T.; MASHONJOWA, E.; CHIPINDU, B.; GEERTS, S.; RAES, D. Using seasonal climate forecasts to improve maize production decision support in Zimbabwe. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 12, p. 792-1799 2011.

6. CAPÍTULO 3

6.1. O milho híbrido AG 7088 expressa maior potencial fisiológico e produtivo sob elevada reposição hídrica no semiárido

Resumo

No período de estiagem, a restrição hídrica provoca desordens fisiológicas e reduz o rendimento do milho no semiárido. Objetivou-se relacionar variáveis fisiológicas instantâneas ao rendimento de grãos de milho sob níveis de reposição da água evapotranspirada (ET_0) e ajustar um modelo de regressão múltipla para estimativa do rendimento de grãos no período de estiagem no semiárido. O experimento foi montado em delineamento de blocos casualizados, com seis níveis de reposição da ET_0 (50%, 75%, 100%, 125%, 150% e 175%). Foram mensuradas taxa de assimilação de CO_2 , condutância estomática, transpiração, déficit de pressão de vapor, temperatura da folha, além da estimativa da eficiência instantânea do uso da água, área foliar, índice de área foliar (IAF) e rendimento de grãos (RG). O híbrido AG 7088 teve bom desempenho fisiológico sob irrigação plena (100% da ET_0), com produção de 5,75 t ha⁻¹, podendo chegar a 6,8 e 7,65 t ha⁻¹ com reposições de 125% e 175% da ET_0 , respectivamente. Mensurações de trocas gasosas, déficit de pressão de vapor e temperatura foliar podem ser realizadas no estágio fenológico R1 para estimar o rendimento de grãos com maior robustez quando combinados com lâminas de água aplicadas durante o ciclo da cultura.

Palavras chave: *Zea mays* L.; lâminas de irrigação; trocas gasosas; rendimento de grãos

Abstract

In the dry season, the water restriction causes physiological disorders and reduces the yield of corn in the semiarid. The objective of this study was to correlate instantaneous physiological variables to corn grain yield under evapotranspiration water replenishment levels (ET_0) and to adjust a multiple regression model to estimate grain yield in the semiarid drought period. The experiment was set up in a randomized complete block design with six ET_0 replacement levels (50, 75, 100, 125, 150 and 175%). CO_2 assimilation rate, stomatal conductance, transpiration, vapor pressure deficit, leaf temperature, and instantaneous water use efficiency, leaf area, leaf area index and grain yield were measured. The hybrid AG 7088 had a good physiological performance under full

irrigation (100% of ET_0), with a yield of 5.75 t ha^{-1} , reaching 6.8 and 7.65 t ha^{-1} with 125 and 175% of ET_0 , respectively. Measurements of gas exchange, vapor pressure deficit and leaf temperature can be performed at the R1 phenological stage to estimate the yield of grains with greater robustness when combined with the water depths applied during the crop cycle.

Key words: *Zea mays* L.; Irrigation depths; Gas exchange; Grain yield.

6.1.1. Introdução

A escassez de água atinge cerca de 52% da população mundial que habita regiões áridas e semiáridas, o que tem aumentado a pressão para redução de recursos hídricos utilizados para irrigação, e ao mesmo tempo manter elevadas produções das culturas para atender a demanda alimentar (GHEYSARI et al., 2017). Má distribuição temporal e espacial das chuvas, associada às mudanças climáticas globais, têm impulsionado a comunidade científica a desenvolver estratégias para maximizar a produção agrícola (LU et al., 2017).

A região Nordeste do Brasil é caracterizada pelo clima semiárido, com limitação hídrica estacional devida aos baixos índices pluviométricos, propensa a ocorrência de déficit hídrico, o que limita a produção agrícola, notadamente no período de estiagem (CIRILO et al., 2017).

O milho é cultivado em diversos locais do globo terrestre (USDA, 2017). A expressividade de seu cultivo é justificada pelo elevado potencial produtivo (LI & SUN, 2016), decorrente da alta capacidade de captação e assimilação de CO_2 inerente ao metabolismo fisiológico C_4 (DANTAS JÚNIOR et al., 2011). Sabe-se que o rendimento de grãos de milho é reduzido sob ocorrência de estresse hídrico (CHILUNDO et al., 2017), sobretudo no período compreendido entre o florescimento e a polinização, indicando desordens fisiológicas nas plantas.

Apesar da expressiva contribuição das plantas C_4 para a segurança alimentar, as respostas das trocas gasosas ao estresse hídrico têm sido pouco estudadas. Evidências indicam que este grupo de plantas é altamente sensível à deficiência hídrica, havendo abrupta redução da condutância ao vapor de água e da taxa de assimilação de CO_2 à medida em que o potencial hídrico foliar é reduzido (GHANNOUM, 2009).

As trocas gasosas são utilizadas como indicadores pontuais do estado hídrico das plantas, possibilitando o diagnóstico instantâneo de desordens fisiológicas causadas pelo

estresse hídrico, que podem refletir em reduções expressivas da produção. No entanto, embora existam modelos ajustados para previsão do rendimento de grãos de milho em função da água aplicada durante o ciclo, pouco se sabe acerca da utilização de variáveis fisiológicas instantâneas para esta finalidade.

Objetivou-se com este trabalho relacionar variáveis fisiológicas instantâneas ao rendimento de grãos do milho híbrido AG 7088 sob níveis de reposição da água evapotranspirada (ET_0) e ajustar um modelo de regressão múltipla para estimativa do rendimento de grãos no período de estiagem no semiárido.

6.1.2. Material e Métodos

6.1.2.1. Condições experimentais

O experimento foi conduzido entre agosto e dezembro de 2015. A área experimental está localizada na Fazenda Tororó III, município de Pão de Açúcar, estado de Alagoas (AL), nas coordenadas de latitude: 09° 45' 20.7'' S, longitude: 37° 25' 12.3'' W e altitude de 18 m. O clima local é classificado como BSh', com predominância de caatinga hipoxerofítica de acordo com a classificação de Köppen (1948). Apresenta temperatura média anual de 27 °C e precipitação média anual de 500 mm (BARROS et al., 2012).

Durante o período de realização da pesquisa, foi feito monitoramento climático expresso por meio das variáveis agroclimáticas obtidas na estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia-INMET (latitude: 09° 44' 56'' S, longitude: 37° 25' 51'' W e altitude de 15 m) localizada a 1,6 km da área experimental, sendo as médias diárias apresentadas na Figura 1.

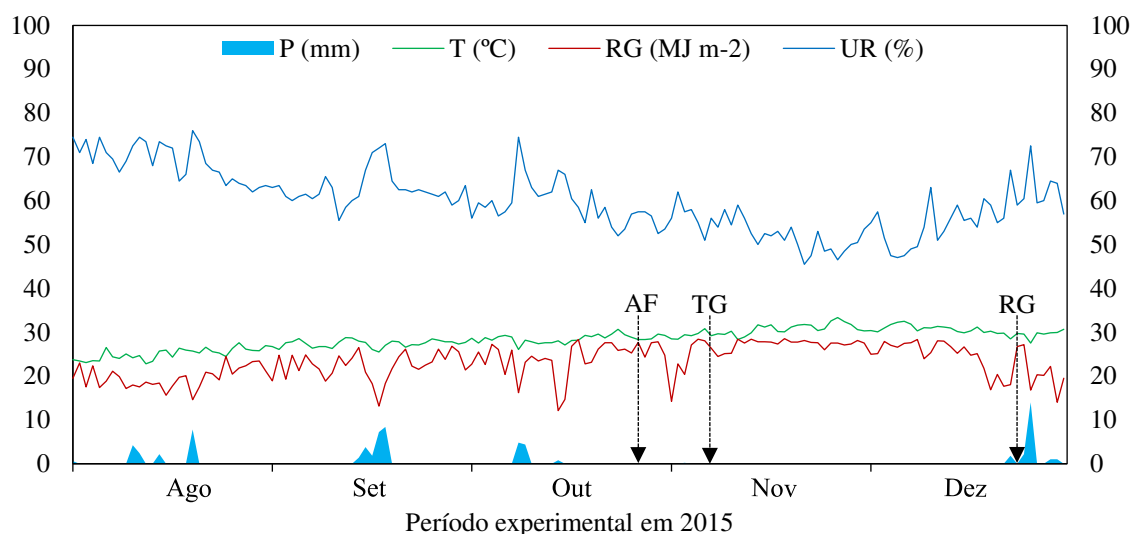


Figura 1. Variáveis meteorológicas registradas durante o período de condução do experimento. P: precipitação pluvial, T: temperatura média do ar, UR: umidade relativa do ar, RG: radiação global, AF: mensurações de área foliar, TG: mensurações de trocas gasosas, RG: quantificação do rendimento de grãos. Pão de Açúcar, AL, 2015.

Na área experimental, previamente à montagem do experimento, foram coletadas 12 amostras simples de solo nas camadas de 0,00-0,30 m e 0,30-0,60 m de profundidade, sendo obtidas amostras compostas representativas de cada profundidade. As amostras foram devidamente acondicionadas e enviadas ao Laboratório de Irrigação e Salinidade da Universidade Federal de Campina Grande para análise dos atributos físicos e químicos (Tabela 1).

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do solo da área experimental. Pão de Açúcar, AL, 2015.

Amostras	Atributos			
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Textura
0,00-0,30 m	60,58	26,50	12,92	FA ¹
0,30-0,60 m	52,65	42,61	4,74	FA ¹
	CC (cm ³ cm ⁻³)	PMP (cm ³ cm ⁻³)	Densidade (g cm ⁻³)	Porosidade (%)
0,00-0,30 m	22,61	6,43	1,39	48,13
0,30-0,60 m	26,47	6,45	1,41	47,78
	pH KCl (1:2,5)	MO (%)	P (ppm)	K (ppm)
0,00-0,30 m	6,54	1,07	31,00	76,00
0,30-0,60 m	5,95	0,93	13,00	43,00

¹: franco arenoso, PMP: ponto de murcha permanente, CC: capacidade de campo, MO: matéria orgânica.

A água utilizada nos experimentos foi proveniente da calha do Rio São Francisco, distante 113 m da área experimental. Foi coletada amostra de 1 L de água no entorno do ponto de captação, acondicionando-a em vasilhame de água lavada três vezes com a própria água coletada e posteriormente encaminhada ao Laboratório Central Analítica em Maceió, AL, para realização de análises químicas e de salinidade, sendo registrados os seguintes valores: pH=8,15, Ca=0,44 mmol_c L⁻¹, Mg=0,16 mmol_c L⁻¹, Na=0,88 mmol_c L⁻¹, K=0,03 mmol_c L⁻¹, Fe=0,08 ppm, Condutividade Elétrica=0,16 dS m⁻¹, Carbonatos=0,00 mmol_c L⁻¹, Bicarbonatos=0,32 mmol_c L⁻¹, Cloretos=0,89 mmol_c L⁻¹, Sulfatos=0,35 mmol_c L⁻¹, Razão de Adsorção de Sódio=1,54, Classe=C1-S1, Classificação Geral= Sem Restrição.

A área experimental total (480 m²) foi cultivada no Sistema de Plantio Direto (SPD), realizando dessecação da cobertura vegetal com aplicação de 1 L ha⁻¹ (0,48 kg i.a. ha⁻¹) de Glifosato 15 dias antes da semeadura. Cada parcela experimental ocupou área de 20,0 m² (5,0 m x 4,0 m), consistindo em cinco linhas de irrigação de 5,0 m de comprimento, com espaçamento de 0,80 m entre as linhas e 0,20 m entre as plantas. Na colheita, uma fileira de cada extremidade da parcela (bordadura) foi descartada, coletando-se área útil de 12 m². A adubação de fundação foi realizada a partir da interpretação da análise do solo, aplicando 45 kg ha⁻¹ de N₂, 138 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 37 kg ha⁻¹ de K₂O.

A semeadura do milho, híbrido AG 7088 da Agrocere, foi realizada em 25 de agosto de 2015, adotando três sementes uniformemente distribuídas. Transcorridos 10 dias após a semeadura (DAS), o desbaste foi realizado adotando-se uma planta por cova, totalizando estande final de 62.500 plantas ha⁻¹. Durante 15 DAS, o solo foi mantido sob irrigação diária com 12,5 mm, considerando este tempo suficiente para o estabelecimento das plântulas no campo.

6.1.2.2. Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com seis tratamentos (lâminas de irrigação), correspondendo aos níveis de reposição da água evapotranspirada (ET_o) de 50%, 75%, 100%, 125%, 150% e 175%, com quatro

repetições. No final do experimento, as lâminas totais aplicadas corresponderam a $L_1=229$ mm, $L_2=343$ mm, $L_3=458$ mm, $L_4=572$ mm, $L_5=687$ mm e $L_6=801$ mm.

A aplicação das lâminas de irrigação correspondente aos tratamentos foi realizada com frequência de dois dias, com base na restituição da água evapotranspirada (ET_o), calculada somando a ET_o de dois dias antes do dia da irrigação. Nos dias de registro de chuvas, durante o ciclo de cultivo, o mesmo foi subtraído de ET_o . Para o cálculo da ET_o diária, utilizou-se o método FAO Penman-Monteith (ALLEN et al., 1989).

Utilizou-se sistema de irrigação localizada por gotejamento, constituído de fita gotejadora de 16 mm de diâmetro nominal, com emissores de vazão $7,5 \text{ L h}^{-1}$ espaçados a cada 0,20 m, operando sob pressão de serviço de 10 mca. Para automação do sistema, adotou-se um conjunto de seis eletroválvulas acionadas a partir de um programador de seis estações. Os tempos necessários para reposição das respectivas lâminas foram gravados no programador a fim de acionar e interromper o funcionamento do sistema de irrigação.

6.1.2.3. Manejo de campo

Logo após o plantio, foi aplicado $4,0 \text{ L ha}^{-1}$ do herbicida seletivo pré-emergente Primestra Gold[®] (Syngenta Proteção de cultivos Ltda). A primeira adubação de cobertura ocorreu aos 22 dias após plantio (DAP), com 112 kg ha^{-1} de uréia (45% de N_2). Aos 25 DAP, para controle da Lagarta do Cartucho (*Spodoptera frugiperda* L.), aplicou-se 150 mL ha^{-1} do inseticida Karatê Zeon 50 CS[®] (Syngenta Proteção de cultivos Ltda). Completados 30 DAP foi aplicado 0,5 L por 100 L d'água do herbicida Roundup Original[®] (Monsanto do Brasil Ltda) para controle de ervas daninhas com jato dirigido nas entrelinhas de plantio. A segunda adubação de cobertura se deu aos 54 DAP, 112 kg ha^{-1} de uréia (45% de N_2). Para E_1 e E_2 , no período compreendido entre 35 e 45 DAP, alguns insetos como: marimbombos, mosca varejeira (*Dermatobia hominis*), serra pau (*Oncideres impluviata*) surgiram na área experimental e foram controlados com uma aplicação do inseticida Connect[®] (Bayer S/A) na dosagem de 750 mL ha^{-1} .

6.1.2.4. Mensuração de trocas gasosas foliares

As avaliações das trocas gasosas foram realizadas aos 72 dias após a semeadura (DAS) no estágio fenológico R1 (FANCELLI, 1986). Foram mensuradas taxa de assimilação de CO₂ (A) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática ao vapor de água (g_s) ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), transpiração (E) ($\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), déficit de pressão de vapor (DPV), temperatura da folha (TF) ($^{\circ}\text{C}$), além da estimativa da eficiência instantânea do uso da água (EIUA) [$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}) (\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1})^{-1}$] calculada a partir da relação A/E (ISLA et al., 2016).

As mensurações foram realizadas na folha +3, no período da manhã (8-10h). Utilizou-se de um sistema portátil de análise de gás por infravermelho (IRGA), modelo e LI-6400XT.

6.1.2.5. Medidas de área foliar

As mensurações de área foliar (AF) foram realizadas aos 60 DAS, no estágio fenológico R1. Foram medidos o comprimento (C) e largura (L) da folha +3 e quantificado o número de folhas verdes (NF) nas cinco plantas da fileira central de cada parcela. A estimativa de área foliar foi obtida pela expressão $AF = [(C * L * 0,75) * (NF + 2)]$. Também foi estimado o índice de área foliar pela expressão $IAF = [AF / (80 * 20)]$, conforme (FRANCIS et al., 1969).

6.1.2.6. Rendimento de grãos

A colheita foi realizada aos 120 DAS, na maturação fisiológica (R6), na fileira central de cada parcela, correspondendo a área útil de 12 m². Após a despalha das espigas secas, os grãos foram removidos do sabugo manualmente, seguindo-se da determinação da massa de grãos e posterior estimativa do rendimento de grãos em toneladas por hectare (t ha^{-1}). Os resultados foram corrigidos para o teor de 130 g kg⁻¹ de umidade nos grãos (ARAÚJO et al., 2016).

6.1.2.7. Análises estatística

Os dados foram padronizados, de modo a tornar a média nula e variância unitária. A estrutura multivariada dos resultados foi avaliada por meio da Análise exploratória de Componentes Principais (ACP), condensando-se a quantidade de informação relevante contida no conjunto de dados originais em um menor número de dimensões, resultantes de combinações lineares das variáveis originais geradas a partir dos autovalores mais elevados na matriz de covariância (HAIR et al., 2009).

A partir da redução das dimensões, os dados originais das variáveis de cada CP foram submetidos à análise de variância multivariada (MANOVA) pelo teste de Hotelling (1947) a 5% de probabilidade em função das lâminas de irrigação. As variáveis do CP associado ao rendimento de grãos (RG) foram submetidas à análise de regressão linear múltipla, considerando-se o RG como variável dependente e as demais variáveis contidas no mesmo CP, mais as lâminas de irrigação, como variáveis independentes, com o intuito de ajustar um modelo de previsão do RG. Foi utilizado o modelo de regressão linear múltipla com k variáveis independentes:

$$RG = \alpha + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ij} + \varepsilon_j$$

em que RG=rendimento de grãos, α =coeficiente linear, β_i =coeficiente de regressão das variáveis independentes X_i , X_{ij} =variáveis independentes X_i na observação j e ε_j =erro associado à variável RG na observação j (CARGNELUTTI FILHO et al., 2004).

6.1.3. Resultados

6.1.3.1. Análises multivariadas

A partir da Análise de Componentes Principais (ACP), foram verificados dois autovalores maiores que a unidade ($\lambda > 1$), indicando a redução do espaço multidimensional das variáveis originais em dois Componentes Principais (CP), que juntos respondem por 90,75% da variância total. Dois processos foram identificados, sendo o primeiro (CP₁) relacionado às trocas gasosas (A, gs, E e DPV), temperatura da folha (TF) e rendimento de grãos (RG), explicando 65,58% da variância acumulada; e o

segundo processo (CP₂), respondendo por 25,17% da variância remanescente, está relacionado à área foliar (AF), índice de área foliar (IAF) e eficiência instantânea do uso da água (EIUA).

Houve efeito significativo das lâminas de irrigação sobre o conjunto de variáveis do CP₁ ($p < 0,01$), enquanto que no CP₂ as lâminas não diferiram ($p > 0,05$). Foram verificadas correlações fortes entre o CP₁ e suas respectivas variáveis, enquanto que no CP₂ uma variável (EIUA) teve correlação forte e duas (AF e IAF) tiveram correlação moderada, conforme classificação de Dancey & Reidy (2013) (Tabela 2).

Tabela 2. Autovalores maiores que a unidade, porção da variância explicada, probabilidade de significância do efeito de lâminas de irrigação e coeficientes de correlação entre os componentes principais e nove variáveis originais.

CPs	λ	$\sigma^2\%$	p	Cargas das variáveis (r)								
				A	gs	E	DPV	TF	EIUA	AF	IAF	RG
CP ₁	5,90	65,58	0,0044	-0,82	-0,91	-0,92	0,95	0,86	0,46	-0,66	-0,66	-0,92
CP ₂	2,27	25,17	0,0895	0,55	0,36	0,34	-0,28	-0,25	0,71	-0,69	-0,69	-0,37

CPs: componentes principais; λ : autovalores; $\sigma^2\%$: porção da variância explicada; p: probabilidade para efeito de lâminas de irrigação pelo teste de Hotelling; A: taxa de assimilação de CO₂; gs: condutância estomática; E: transpiração; DPV: déficit de pressão de vapor; TF: temperatura foliar; EIUA: eficiência instantânea do uso da água; AF: área foliar; IAF: índice de área foliar; RG: rendimento de grãos; r=0,10-0,30 (fraca); r=0,40-0,60 (moderada); r=0,70-1,00 (forte).

6.1.3.2. Fisiologia da produção

A Figura 2 ilustra a projeção bidimensional dos dois componentes principais (CP₁ x CP₂). No CP₁, observa-se que as lâminas de irrigação L₁ e L₂ diferem das lâminas L₆, L₃ e L₄, respectivamente. Valores mais expressivos de assimilação de CO₂ (22,49 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (0,09 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e transpiração (4,46 $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foram registrados com reposição de 100% da ET₀ (L₃), representando aumentos de 51, 55 e 49%, quando comparados aos 11,01 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 0,04 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 2,27 $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ registrados com a reposição de 50% da ET₀ (L₁).

Maior déficit de pressão de vapor (5,36 kPa) e temperatura foliar (37,33 °C) foram evidenciados em plantas cultivadas sob déficit de irrigação com 50% da ET_0 (L_1). Quando irrigadas com 100% da ET_0 (L_3), ocorre redução de 9% no DPV e 2% na TF, chegando 4,88 kPa e 36,60 °C, respectivamente (Figura 2).

A lâmina de irrigação L_6 , 175% da ET_0 , promoveu maior rendimento de grãos de milho (7,65 t ha⁻¹), representando diferença percentual de 46% em relação ao rendimento de 4,10 t ha⁻¹ obtido com a reposição de 50% da ET_0 (L_1) (Figura 1).

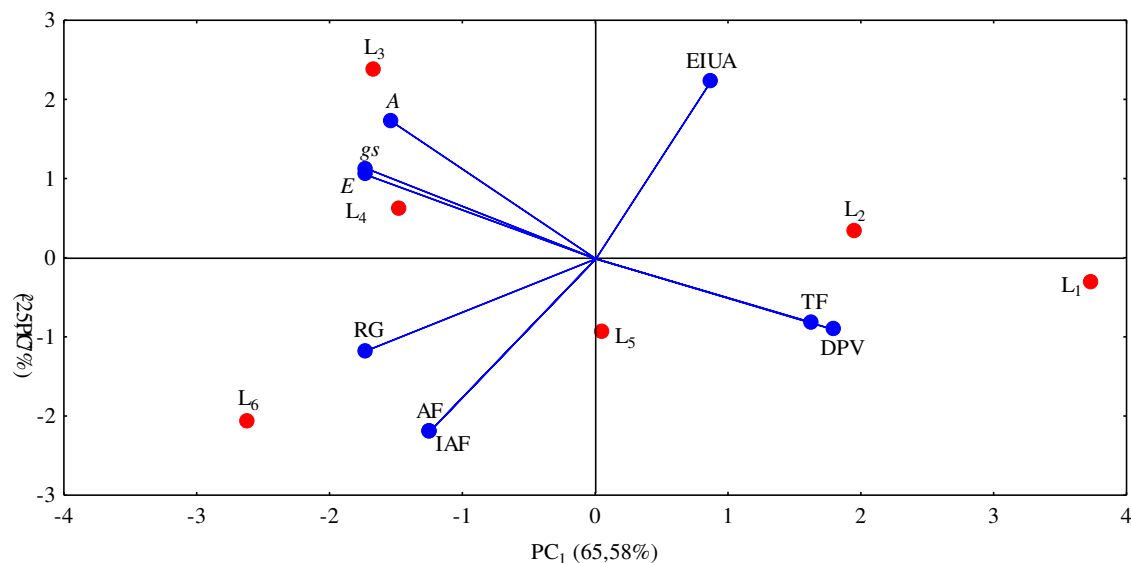


Figura 2. Projeção bidimensional (biplot) das lâminas de irrigação (●L) e nove variáveis (●) nos dois componentes principais (CP) 1 x 2. $L_1=50\%$ (229 mm), $L_2=75\%$ (343 mm), $L_3=100\%$ (458 mm), $L_4=125\%$ (572 mm), $L_5=150\%$ (687 mm) e $L_6=175\%$ (801 mm). A: taxa de assimilação de CO_2 ; gs: condutância estomática; E: transpiração; DPV: déficit de pressão de vapor; TF: temperatura foliar; EIUA: eficiência instantânea do uso da água; AF: área foliar; IAF: índice de área foliar e RG: rendimento de grãos.

A partir da análise de variância, verificou-se que a regressão múltipla foi significativa ($p=0,0025$), com R -múltiplo=0,81, $R^2=0,66$ e R^2 -ajustado=0,54, sendo ajustado o modelo para estimativa do rendimento de grãos, a saber:

$$RG \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = - 47,4022 + L*0,0020 - A*0,2198 - gs*88,6360 + E*2,3065 - DPV*12,9372 + TF*3,2422$$

em que RG: rendimento de grãos; L: lâmina de irrigação; A: taxa de assimilação de CO₂; *g_s*: condutância estomática; *E*: transpiração; DPV: déficit de pressão de vapor; TF: temperatura foliar.

Utilizando-se do modelo de regressão linear múltipla, as médias de cada variável de entrada foram empregadas para estimativa do rendimento de grãos nas respectivas lâminas de irrigação. Na lâmina L₁ (50% da ET_o), L₂ (75% da ET_o) e L₆ (175% da ET_o), o modelo subestimou o rendimento de grãos em 5,2, 4,5 e 4,3%, respectivamente, representando diferenças de 0,214, 0,212 e 0,328 t ha⁻¹ em relação às médias observadas; e nas lâminas L₃ (100% da ET_o) e L₄ (150% da ET_o) o modelo superestimou o RG em 6,3 e 5,5%, com aumentos de 0,385 e 0,397 t ha⁻¹ em relação aos valores médios observados (Figura 3).

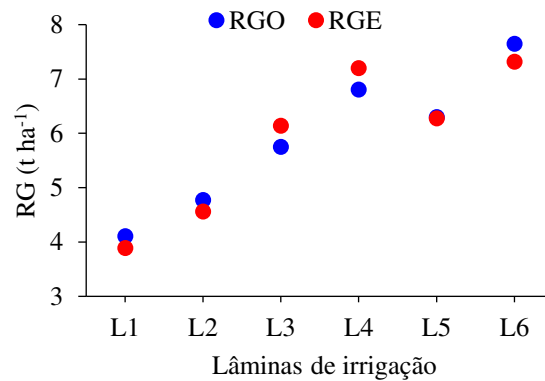


Figura 3. Rendimentos de grãos observados (●RGO) e estimados (●RGE) pelo modelo de regressão múltipla em cada lâmina de irrigação. L₁=50% (229 mm), L₂=75% (343 mm), L₃=100% (458 mm), L₄=125% (572 mm), L₅=150% (687 mm) e L₆=175% (801 mm).

6.1.4. Discussão

6.1.4.1. Trocas gasosas

O aparato fotossintético (C₄) do milho responde de forma expressiva ao estresse hídrico, tanto por déficit de água no solo quanto por excesso (GHANNOUM, 2009). De fato, os melhores resultados de trocas gasosas (*A*, *g_s* e *E*) foram observados sob irrigação plena com 100% da ET_o, enquanto as plantas cultivadas sob déficit de irrigação (50 e 75% da ET_o) tiveram redução expressiva nestas variáveis. Sob déficit hídrico moderado, o

milho aumenta a resistência ao vapor de água por fechar parcialmente os estômatos e reduzir a condutância estomática, ocasionando menor taxa de assimilação de CO₂ e transpiração (MAGALHÃES et al., 2009).

Sob deficiência hídrica moderada, cerca de dois terços do declínio da assimilação líquida de CO₂ se deve à redução da *g_s*; sob deficiência severa, ocorrem limitações não estomáticas (GRZESIAK et al., 2006; 2007), por exemplo, a inibição do metabolismo bioquímico, reduzindo a fluorescência da clorofila *a*; além da diminuição da atividade do sistema de carboxilação, decorrente da elevada concentração intracelular CO₂ provocada pelo aumento da resistência dos estômatos à perda de vapor de água (XU & ZHOU, 2006; RIPLEY et al., 2007; XU et al., 2008).

As plantas mantidas sob irrigação plena expressaram melhor funcionamento do aparato fotossintético, indicado pelas trocas gasosas elevadas, pelo fato do adequado suprimento hídrico garantir o desenvolvimento normal da anatomia e ultraestrutura foliar, a atividade plena das enzimas fotossintéticas e diminuir a assimilação de nitrato e senescência foliar precoce. Ressalte-se que, nas plantas cultivadas sob déficit de irrigação, podem ter ocorrido desordens nos aspectos mencionados anteriormente, tendo como principal reflexo negativo a fotorrespiração, justificada pela limitação da assimilação de CO₂ induzir a Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) a utilizar o O₂ como substrato, representando um empecilho ao bom desempenho bioquímico da planta, pois o O₂ é subproduto da fotossíntese e está em elevada concentração na atmosfera (GHANNOUM, 2009).

6.1.4.2. Déficit de pressão de vapor e temperatura foliar

O elevado déficit de pressão de vapor registrado nas plantas cultivadas sob reposição de 50% da ET_o está relacionado à associação do reduzido teor de água no sistema solo-planta-atmosfera e fatores climáticos como, elevada radiação solar global (28,03 MJ m⁻²), alta temperatura do ar (30,8 °C) e baixa umidade relativa do ar (51%), registrados no dia da mensuração do DPV. Estes resultados são ratificados por Almeida (2016) ao relatar que baixo potencial hídrico no solo e elevado DPV provocam estresse em plantas de milho. De fato, o déficit hídrico causa redução do potencial hídrico foliar, da *g_s* e da turgescência foliar, refletindo em aumento do DPV (MARTINS et al., 2010).

Neste estudo, plantas sob irrigação plena (100% da ET_0) tiveram menor temperatura da folha (TF), o que se deve à elevada transpiração (E) decorrente da maior abertura dos estômatos em relação às plantas cultivadas sob irrigação deficitária (TESTI et al., 2008; TRENTIN et al., 2011). À medida que a transpiração aumenta, há uma redução na temperatura foliar devido à dissipação de energia na forma de calor latente, equilibrando a temperatura das folhas com a temperatura do ar (VIEIRA et al., 2014).

6.1.4.3. Rendimento de grãos

O rendimento de grãos (RG) de milho foi reduzido sob déficit hídrico (50% da ET_0) quando comparado às plantas bem irrigadas (100 e 175% da ET_0), o que reflete a sensibilidade da cultura à estiagem no período crítico, compreendido entre o florescimento e a maturação (BERGAMASCHI et al., 2004), isso denota a importância de avaliar as trocas gasosas no período decisivo visando identificar estratégias de recuperação da planta estressada em tempo hábil.

Em plantas de milho cultivadas sob estresse, suprir a demanda hídrica adequadamente no período que antecede a emissão das anteras pode evitar a redução de 50% do rendimento de grãos; se a interrupção do estresse ocorrer em pleno florescimento, é possível evitar decréscimos de 20% nos dois primeiros dias e até 50% até os oito dias (PEGORARE et al., 2009).

Reduções graduais do RG ocorrem, principalmente, pela diminuição do número de grãos por espiga. Salienta-se que as reduções de RG sob déficit hídrico, no período reprodutivo, se devem aos processos fisiológicos ligados à formação do zigoto, e ao desenvolvimento inicial de grãos, sobretudo pelo menor aporte de fotossintatos para os grãos em desenvolvimento (BERGAMASCHI et al., 2006).

Estimativas do rendimento final de grãos de milho é possível a partir de dados de campo baseados no déficit hídrico durante o período crítico (MEDEIROS et al., 1991; MATZENAUER et al., 1995). Contudo, modelos baseados em parâmetros de trocas gasosas (A , g_s e E), déficit de pressão de vapor e temperatura da folha são desconhecidos para estimativa de rendimento de grãos de milho no período crítico de deficiência hídrica. Assim, o modelo múltiplo apresentado nesta pesquisa pode incrementar o aparato tecnológico para manejo hídrico da cultura. É importante destacar que o efeito do déficit

hídrico deve ser avaliado em períodos mais restritos e precisos, quando a deficiência hídrica é mais severa (BERGAMASCHI et al., 2006).

6.1.5. Conclusão

Esta pesquisa evidenciou que nas condições de semiaridez; durante o período de estiagem (agosto a dezembro), com temperatura média acima do ideal (28,4 °C) e umidade relativa do ar abaixo do ótimo para a cultura (60,1%) durante o ciclo; o híbrido AG 7088 teve bom desempenho fisiológico sob irrigação plena (100% da ET_o), com produção de 5,75 t ha⁻¹, podendo chegar a 6,8 e 7,65 t ha⁻¹ com reposições de 125 e 175% da ET_o , respectivamente. Mensurações de trocas gasosas, déficit de pressão de vapor e temperatura foliar podem ser realizadas no estágio fenológico R1 para estimar o rendimento de grãos com maior robustez quando combinados com as lâminas de água aplicadas durante o ciclo da cultura.

6.1.6. Referências

ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. Operational estimate of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v. 81, p. 650-662, 1989.

ALMEIDA, B. M. **Déficit e excesso hídrico na cultura do milho (*Zea mays* L.) em ambiente protegido**. 2016. 124f. Tese (Doutorado em Ciências). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo.

ARAÚJO, L. S.; SILVA, L. G. B.; SILVEIRA, P. M.; RODRIGUES, F.; LIMA, M. L. P.; CUNHA, P. C. R. Desempenho agrônômico de híbridos de milho na região sudeste de Goiás. **Revista Agroambiente**, v. 10, p. 334-341, 2016.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MÜLLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MÜLLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.;

PEREIRA, P. G. Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 243-249, 2006.

CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L.; LÚCIO, A. D. C. Identificação de variáveis causadoras de erro experimental na variável rendimento de grãos de milho. **Ciência Rural**, v. 34, p. 707-713, 2004.

CHILUNDO, M. J. A.; WESSTRÖM, I.; BRITO, R.; MESSING, I. 2017. Response of maize root growth to irrigation and nitrogen management strategies in semi-arid loamy sandy soil. **Field Crops Research**, v. 200, p. 143-162, 2017.

CIRILO, J. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CAMPOS, J. N. B. The Issue of Water in the Brazilian Semi-Arid Region. In: **Waters of Brazil**; BICUDO, C. E. D. M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. (eds.). Springer International Publishing, p. 59-71, 2017

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia**. Porto Alegre: Artmed, 2013. 608 p.

DANTAS JÚNIOR, E. E.; GARÓFALO, L. H.; COSTA, F. A. M.; KORNDORFER, G. H. Desenvolvimento de milho irrigado e adubado com silicato de cálcio e magnésio. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 5, p. 337-350, 2011.

FANCELLI, A. L. **Plantas Alimentícias: guia para aula, estudos e discussão**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1986. 131 p.

FRANCIS, C. A.; RUTGER, J. N.; PALMER, F. E. A Rapid Method for Plant Leaf Area Estimation in Maize (*Zea mays* L.). **Crop Science**, v. 9, p. 537-539, 1969.

GHANNOUM, O. C₄ photosynthesis and water stress. **Annals of Botany**, v. 103, p. 635-644, 2009.

GHEYSARI, M.; SADEGHI, S. H.; LOESCHER, H. W.; AMIRI, S.; ZAREIAN, M. J.; MAJIDI, M. M.; ASGARINIA, P.; PAYERO, J. O. Comparison of deficit irrigation management strategies on root, plant growth and biomass productivity of silage maize. **Agricultural Water Management**, v. 182, p. 126-138, 2017.

GRZESIAK, M. T.; GRZESIAK, S.; SKOCZOWSKI, A. Changes of leaf water potential and gas exchange during and after drought in triticale and maize genotypes differing in drought tolerance. **Photosynthetica**, v. 44, p. 561-568, 2006.

GRZESIAK, M. T.; RZEPKA, A.; HURA, T.; HURA, K.; SKOCZOWSKI, A. Changes in response to drought stress of triticale and maize genotypes differing in drought tolerance. **Photosynthetica**, v. 45, p. 280-287, 2007.

HAIR, F. J.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise Multivariada de Dados**. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.

HOTELLING, H. Multivariate quality control. In **Techniques of Statistical Analysis**, EISENHART, C.; HASTAY, M. W.; WALLIS, W. A. (eds). New York: John Wiley & Sons. 1947.

ISLA, R.; GUILLÉN, M.; SALMERÓN, M. Nitrogen availability effects on gas exchange measurements in field-grown maize (*Zea mays* L.) under irrigated Mediterranean conditions. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 14, p. 1-9 2016.

LI, Z.; SUN, Z. Optimized single irrigation can achieve high corn yield and water use efficiency in the Corn Belt of Northeast China. **European Journal of Agronomy**, v. 75, p. 12-24, 2016.

LU, H. D.; XUE, J. Q.; GUO, D. W. Efficacy of planting date adjustment as a cultivation strategy to cope with drought stress and increase rainfed maize yield and water-use efficiency. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 227-235, 2017.

MAGALHÃES, P. C.; SOUZA, T. C.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; KARAM, D.; MAGALHÃES, M. M.; CANTÃO, F. R. O. Caracterização ecofisiológica de linhagens de milho submetidas a baixa disponibilidade hídrica durante o florescimento. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 8, p. 223-232, 2009.

MARTINS, J. D.; CARLESSO, R.; KNIES, A. E.; OLIVEIRA, Z. B.; BROETTO, T.; RODRIGUES, G. J. Potencial hídrico foliar em milho submetido ao déficit hídrico. **Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**, v. 15, p. 324-334, 2010.

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; RIBOLDI, J. Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 1, p. 225-241, 1995.

MEDEIROS, S. L. P.; WESTPHALEN, S. L.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Relação entre evapotranspiração e rendimento de grãos de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, p. 1-10, 1991.

PERGORARE, A. B.; FEDATTO, E.; PEREIRA, S. B.; SOUZA, L. C. F.; FIETZ, C. R. Irrigação suplementar no ciclo do milho “safrinha” sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 262-271, 2009.

RIPLEY, B. S.; GILBERT, M. E.; IBRAHIM, D. G.; OSBORNE, C. P. Drought constraints on C₄ photosynthesis: stomatal and metabolic limitations in C₃ and C₄ subspecies of *Alloteropsis semialata*. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, p. 1351-1363, 2007.

TESTI, L.; GOLDHAMER, D. A.; INIESTA, F.; SALINAS, M. Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. **Irrigation Science**, v. 26, p. 395-405, 2008.

TRENTIN, R.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; STEIDLE NETO, A. J. Transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar sob diferentes valores de potencial matricial. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 1085-1095, 2011.

USDA - United States Department of Agriculture. **World Agricultural Production**. Série Circular. 2017. 29p. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2017.

VIEIRA, G. H. S.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; DELAZARI, F. T. Indicadores morfo-fisiológicos do estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação. **Bioscience Journal**, v. 30, p. 65-75, 2014.

XU, Z. Z.; ZHOU, G. S. Nitrogen metabolism and photosynthesis in *Leymus chinensis* in response to long-term soil drought. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 25, p. 252-266, 2006.

XU, Z. Z.; ZHOU, G. S.; WANG, Y. L.; HAN, G. X.; LI, Y. J. Changes in chlorophyll fluorescence in maize plants with imposed rapid dehydration at different leaf ages. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 27, p. 83-92, 2008.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na região semiárida de Alagoas, o milho híbrido AG 7088 manteve os componentes de produção elevados, com rendimento de 12 t ha^{-1} durante o período chuvoso, mesmo sob variação de lâminas de irrigação, denotando que na época das águas a reposição de 50% da ET_0 é suficiente para manutenção do vigor do híbrido nesta localidade. Por outro lado, no período de estiagem, o híbrido teve melhor crescimento e rendimento sob reposição de 175% da ET_0 , embora a produção obtida com esta reposição ($8,8 \text{ t ha}^{-1}$) esteja abaixo da média esperada (10 t ha^{-1}).

A tomada de decisões sobre a melhor estratégia de cultivo do híbrido AG 7088 em safras futuras no município de Pão de Açúcar no semiárido de Alagoas deve levar em consideração as estimativas de produção obtidas a partir do modelo AquaCrop/FAO[®], uma vez que este modelo foi calibrado com boa performance, exatidão e qualidade para esta localidade.

Deve-se considerar, no período de estiagem, a mensuração de variáveis fisiológicas instantâneas durante o período compreendido entre florescimento e polinização, uma vez que estas variáveis estão fortemente relacionadas ao rendimento de grãos e podem ser utilizadas em um modelo de regressão múltipla para predição do rendimento, permitindo a realização de ajustes das lâminas de irrigação para obtenção de produção elevada.