



INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS

CAMPUS PIRANHAS

CURSO SUPERIOR EM BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÔNOMICA

EDMAÍRIS RODRIGUES ARAÚJO

**ÍNDICE DE CLOROFILA E PRODUTIVIDADE ECONÔMICA DO MILHO
IRRIGADO NO SERTÃO ALAGOANO**

PIRANHAS, AL

2022

EDMAÍRIS RODRIGUES ARAÚJO

**ÍNDICE DE CLOROFILA E PRODUTIVIDADE ECONÔMICA DO MILHO
IRRIGADO NO SERTÃO ALAGOANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior em Bacharelado em Engenharia Agrônômica do Instituto Federal de Alagoas, *campus* Piranhas como requisito final para a obtenção do grau de Engenheira Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Silva

PIRANHAS, AL

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal de Alagoas
Campus Piranhas
Biblioteca Tabela Cacilda Damasceno Freitas

A663i Araújo, Edmaíris Rodrigues.

Índice de clorofila e produtividade econômica do milho irrigado no Sertão Alagoano.–2022.
1 CD-ROM: il., col. (1 arquivo, 1.460 KB).

CD-ROM contendo o arquivo no formato PDF do trabalho acadêmico com 47 folhas, acondicionado em caixa acrílica (12,5 cm x 14 cm).

Trabalho de Conclusão de curso (graduação em Engenharia Agrônoma) - Instituto Federal de Alagoas, *Campus Piranhas*, Piranhas, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Samuel Silva.

1. Pigmento fotossintetizantes . 2. Lâminas de água. 3. Incremento agrícola.
I. Título.

CDD: 633.15

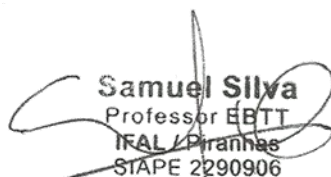
Fabio Fernandes Silva
Bibliotecário – CRB- 4/2302

EDMAÍRIS RODRIGUES ARAÚJO

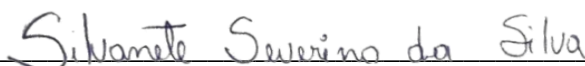
**ÍNDICE DE CLOROFILA E PRODUTIVIDADE ECONÔMICA DO MILHO
IRRIGADO NO SERTÃO ALAGOANO**

Aprovado em: 23/02/2022.

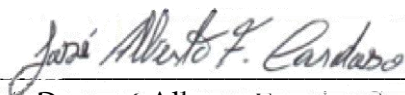
BANCA EXAMINADORA


Samuel Silva
Professor EBT
IFAL / Piranhas
STAPE 2290906

Prof. Dr. Samuel Silva (Orientador)
Instituto Federal de Alagoas – IFAL



Profa. Dra. Silvanete Severino da Silva
(UFERSA – Campus Mossoró)



Proi. Dr. José Alberto Ferreira Cardoso
Instituto Federal do Tocantins – IFTO

A **Força Maior** que rege o universo

Aos meus avós

José Araújo e Maria Beatriz

Pedro Bernardino e Maria Pastoura

Manoel Porfírio (póstumo)

Aos meus pais

Edivânio Araújo e Maria José Rodrigues

Aos meus irmãos

Edmária e Edivanderson

Aos meus sobrinhos

Otto, Analice e Natan

Dedico!

Ao meu orientador:

Prof. Dr. Samuel Silva

Ofereço!

AGRADECIMENTO

Ao IFAL-Campus Piranhas pela oportunidade e acolhimento contínuos, desde 2013 até o presente momento, em mais uma etapa de minha formação acadêmica;

Ao meu orientador, professor Dr. Samuel Silva, pela confiança e paciência, pelos conhecimentos transmitidos, pela amizade, respeito, dedicação e estímulo nos estudos;

Aos professores doutores Silvanete Silva e Alberto Ferreira, por terem aceitado o convite para fazer parte da banca examinadora e pelas instruções e sugestões neste trabalho;

Aos colegas do Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia (LIDREN): Carla Sabrina, Jonatas Emanuel, Amanda Cibele, Julhe Caroline, Lucas Gabriel, Vitor Alves, Mônica, Gustavo, Anne Caroline, Isabela e todos os demais importantíssimos que eu não tenha citado aqui, pela convivência, amizade e inestimável contribuição na condução do experimento;

Aos meus amigos: Ivan, Maria Amélia, Sabrina, Willyane, Évillyn, Daniele, Jonatas Emanuel, Maria Gabriela, Juliane, Fernanda, Gustavo, Lucas Eike, Josimar, Ewerton, Bárbara, Ranniele e Edclésia, pela amizade construída, o companheirismo e camaradagem constantes e pelos momentos compartilhados;

A todos os meus amigos de turma, pela amizade, companheirismo e momentos compartilhados durante nossa jornada acadêmica;

Ao corpo docente do curso de Bacharelado em Engenharia Agrônoma do IFAL-Campus Piranhas, pela inestimável contribuição na minha formação acadêmica e profissional;

Ao Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia (LIDREN) do IFAL-Campus Piranhas, por ser minha casa nos últimos anos;

Aos meus pais, Maria e Edivânio, pelo dom da vida e pelo apoio e amor incondicionais durante toda a minha existência;

Aos meus irmãos, Edmária e Edivanderson, pelo companheirismo e apoio de toda uma vida;

Aos meus sobrinhos, Otto, Analice e Natan, pela felicidade e amor imensos que transbordam em mim desde que vocês chegaram;

A Maria Amélia, minha companheira de todas as horas, pela compreensão, paciência, conselhos e incentivo.

Aos meus tios, tias, familiares e todos os que acreditaram em mim e me ajudaram, de forma direta e indireta, a concluir este trabalho.

Meus sinceros agradecimentos!

*“O aprendizado é o significado mais límpido da vida,
pois jamais se termina uma existência sem que se aprenda algo.”*

Maria Clara Fraga Lopes.

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo avaliar o efeito do estresse hídrico sobre o índice de clorofila do milho e determinar a lâmina econômica de irrigação para cultura na região do Sertão Alagoano. Para tal, o híbrido AG7088 foi submetido a cinco lâminas de irrigação (40, 80, 120, 160 e 200% da ETc) em experimento conduzido no Instituto Federal de Alagoas/Campus Piranhas, com delineamento experimental em esquema de faixas e quatro repetições. Foram utilizados três valores de cotação da saca de milho para a estimativa da lâmina de máxima eficiência econômica (X_{ec}). A colheita foi realizada aos 98 DAS, em que a produtividade de grãos com 12% de umidade atingiu 2.052,7 e 11.833 kg ha⁻¹ e eficiência no uso da água de 128,5 e 45 mm t⁻¹ nos tratamentos com 40 e 160% da ETc, respectivamente. A produtividade máxima física ($Y_{máx}$) estimada pela função de produção foi de 11.267 kg ha⁻¹, obtida com 919,2 mm de água de irrigação. As produtividades máximas econômicas (Y_{ec}) para o preço da saca do milho igual a R\$ 50,00, 80,00 e 110,00, foram iguais a 10.971, 11.225 e 11.251 kg ha⁻¹, obtidas com lâminas de 790,7 (143,6% da ETc), 871 (158,2% da ETc) e 889,5 mm (161,8% da ETc), respectivamente. Já a lâmina econômica foi de 525, 326 e 262 mm, respectivamente, para os cenários de cotação citados. O IFC apresenta relação direta com o suprimento hídrico fornecido, em que o aumento do fornecimento de água proporciona incremento da clorofila nas plantas até determinando limite, reduzindo com o excesso de água aplicada.

Palavras-chave: pigmento fotossintetizantes, lâminas de água, incremento agrícola.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effect of water stress on the chlorophyll content of corn and to determine the economic irrigation depth for the crop in the Sertão Alagoano region. For this, the hybrid AG7088 was submitted to five irrigation depths (40, 80, 120, 160 and 200% of the ETc) in an experiment carried out at Instituto Federal de Alagoas/Campus Piranhas, with an experimental design in a band scheme and four replications. Three values of price per bag of corn were used to estimate the maximum economic efficiency depth (Xec). Harvest was carried out at 98 DAS, in which grain yield with 12% moisture reached 2,0527 and 11,833 kg ha⁻¹ and water use efficiency of 128.5 and 45 mm t⁻¹ in treatments with 40 and 160% of ETc, respectively. The maximum physical productivity (Ymax) estimated by the production function was 11,267 kg ha⁻¹, obtained with 919.2 mm of irrigation water. The maximum economic yields (Yec) for the price of a bag of corn equal to R\$ 50.00; 80.00 and 110.00 were equal to 10,971, 11,225 and 11,251 kg ha⁻¹, obtained with water depths of 790.7 (143,6% of ETc), 871 (158,2% of ETc) and 889,5 mm (161,8% of ETc), respectively. The economic blade was 525, 326 and 262 mm, respectively, for the quoted quotation scenarios. The IFC has a direct relationship with the water supply provided, in which the increase in the water supply provides an increase in chlorophyll in the plants up to a certain limit, reducing with the excess of water applied.

Keywords: photosynthetic pigment, water depths, agricultural increments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fenologia do milho: estádios de desenvolvimento da cultura.	17
Figura 2 – Estimativa de K_c único ao longo do crescimento da planta de acordo com o boletim FAO 56.	24
Figura 3 – Mapa e imagem de satélite do IFAL – Campus Piranhas, localizado na cidade de Piranhas-AL, destacando a área do experimento (quadro com borda amarela).	25
Figura 4 – Croqui do experimento.	26
Figura 5 – Plantio manual na área experimental (A) e adubação de plantio, para composição dos tratamentos com cinco níveis de irrigação durante o ciclo de produção do milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.	27
Figura 6 – Cabeçal de controle (A) e sistema de irrigação (B) montados na área experimental, para composição dos tratamentos com cinco níveis de irrigação durante o ciclo de produção do milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.	28
Figura 7 – Medição do Índice de Clorofila Falker (ICF) com clorofilômetro ClorofiLOG® modelo CFL 1030 (A) e detalhe do efeito das lâminas de irrigação na coloração das folhas de milho (B) para os tratamentos com cinco níveis de irrigação durante o ciclo de produção do milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.	29
Figura 8 – Umidade relativa e temperatura do ar diária durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.	32
Figura 9 – Distribuição de chuva, evapotranspiração de referência (ET_0) e lâminas de irrigação diárias (lâmina comum a todos os tratamentos na fase inicial e L1, L2, L3, L4 e L5 nas fases de crescimento, intermediária e final) durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.	33
Figura 10 – Umidade crítica (UC), capacidade de água disponível (CAD) e Armazenamento de água no solo (ARM) (A). Evapotranspiração real da cultura diária (ETr) e acumulada (ETr Acumulada) (B), para os tratamentos com cinco níveis de irrigação durante o ciclo de produção do milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.	35
Figura 11 – Índice de Clorofila Falker (ICF) para clorofila total (pigmentos a+b) de milho submetido a cinco lâminas de irrigação (230, 452, 658, 874 e 1.080 mm) aos 63 (A), 77 (B) e 91 (C) dias após a semeadura, durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.	38

Figura 12 – Produtividade de grão em função das lâminas totais efetivas (chuva efetiva + irrigação efetiva) aplicadas durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.	40
Figura 13 – Margem de Contribuição Agrícola (MCA) na produção de grãos em função das lâminas totais efetivas (chuva efetiva + irrigação efetiva) aplicadas durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.....	41
Figura 14 – Eficiência no Uso da Água (EUA) na produção de grãos em função das lâminas totais efetivas (chuva efetiva + irrigação efetiva) aplicadas durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estádios de desenvolvimento da cultura do milho estabelecido.....	17
Tabela 2 - Características físicas do solo ¹ e classificação realizada por Sousa <i>et al.</i> (2010)..	25
Tabela 3 – Custo do milímetro de água para irrigação por gotejamento na cultura do milho.	31
Tabela 4 – Cenários de cotação da saca (60 kg) e do kg de milho, fevereiro de 2022, utilizados na análise econômica.	31
Tabela 5 – Valores totais de irrigação, percentagem da ETc atingida pelas lâminas e evapotranspiração total da cultura (ETc) para os tratamentos com cinco níveis de irrigação durante o ciclo de produção do milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.	37
Tabela 6 – Resumo da análise de variância pelo teste de Tukey para o Índice de Clorofila Falker (IFC) para Clorofila Total, durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.	37
Tabela 7 – Valores de lâmina máxima econômica e produtividade econômica para diferentes preços de venda de da saca de milho (60 kg) cultivado com irrigação durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.....	40

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	15
2.1. Objetivo Geral	15
2.2. Objetivos Específicos	15
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1. Aspectos gerais da cultura do milho	15
3.2. Crescimento e fenologia do milho	16
3.3. Fatores que influenciam o crescimento, desenvolvimento e produtividade do milho..	19
3.3.1. Variáveis Agrometeorológicas	19
3.3.2. Demanda Hídrica da Cultura.....	20
3.3.3. Relação da clorofila com o déficit hídrico	21
3.3.4. Irrigação no cultivo do milho	22
3.3.5. Eficiência no Uso da Água (EUA).....	24
3.4. Função resposta e produtividade de máxima eficiência econômica	24
4. METODOLOGIA	25
4.1. Descrição da área experimental	25
4.2. Delineamento, tratamentos e unidade experimental	26
4.3. Instalação e condução do experimento	26
4.4. Irrigação	27
4.5. Variáveis agronômicas.....	28
4.6. Variáveis agrometeorológicas	29
4.7. Função resposta e produtividade de máxima eficiência econômica	29
4.8. Análises estatísticas	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1. Variáveis Agrometeorológicas	31
5.2. Balanço de Água no Solo e Evapotranspiração da Cultura	34
5.3. Índice de Clorofila	37
5.4. Análise Econômica e Eficiência no Uso da Água	39
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é cultivado em quase todos os países sob diferentes climas e manejos, sendo, portanto, considerada uma cultura de importância mundial (ALMEIDA *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2021). Na região Nordeste (NE) do Brasil o milho é um dos cereais mais consumidos tanto como produto industrializado como na forma *in natura*, devido à sua utilização na alimentação humana e animal, desempenhando importante papel socioeconômico para a região.

Para a Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2020), os Estados nordestinos que mais produziram milho na safra 2019/20 foram: Bahia (2,48 milhões de t e 4,18 t ha⁻¹), Maranhão (2,2 milhões de t e 4,8 t ha⁻¹) e Piauí (2,19 milhões de t e 4,7 t ha⁻¹). Alagoas ocupa o oitavo lugar, com produção anual de 61,4 mil toneladas e o rendimento médio de, aproximadamente, 1,6 t ha⁻¹ ao ano. Esse baixo rendimento agrícola comparado aos demais Estados do NE ocorre, principalmente, devido à distribuição irregular da precipitação pluvial.

Em Alagoas, a maior parte dos cultivos de milho predomina no período chuvoso, em regime de sequeiro, onde toda a demanda hídrica da cultura é suprida exclusivamente pela chuva (ARAÚJO *et al.*, 2021). Nessa situação o cultivo fica suscetível a ocorrência de veranicos, sujeitando a cultura ao déficit hídrico, em que essa baixa disponibilidade de água no solo é fator limitante para o desenvolvimento e a produtividade das culturas agrícolas (ARAÚJO *et al.*, 2018).

Por ser o veículo de condução dos nutrientes até a interface solo-raiz e no xilema, a água pode interferir na fisiologia da planta, na dinâmica de absorção e na utilização dos nutrientes (FERREIRA *et al.*, 2008), influenciando, indiretamente, a produção de clorofila e, conseqüentemente, na produção de fotoassimilados. Assim, a necessidade hídrica do milho no estado de Alagoas, que é de 457 a 650 mm para região Semiárida (ARAÚJO *et al.*, 2021) e 225 a 304 mm na Zona da Mata (SILVA *et al.*, 2016) durante o ciclo de produção, quando não é totalmente suprida pela chuva, deve ser complementada através da irrigação.

Neste sentido, a irrigação além de suprir esta deficiência, pode favorecer o cultivo de uma segunda safra na estação seca. Entretanto, o uso inadequado dos recursos hídricos na agricultura irrigada, em função da busca por elevadas produtividades, vem contribuindo para o alto desperdício de água, sobretudo em locais onde esse recurso é escasso, resultando em conseqüências indesejáveis ao meio ambiente (BIZARI *et al.*, 2011).

Desse modo, convém fazer uso dos sistemas de irrigação localizada, os quais apresentam melhor eficiência e uniformidade de aplicação de água, baixo consumo de energia

e mantém a umidade do solo sempre próximo à capacidade de campo (BOAS *et al.*, 2011). Todavia, na região do sertão alagoano ainda existem poucos estudos científicos nessa área, haja vista que a maioria das tecnologias é desenvolvida para o cultivo em condições de sequeiro.

Assim, quando o objetivo é maximizar a Eficiência do Uso da Água (EUA), uma das opções é adotar a irrigação deficitária, ou seja, irrigar abaixo do nível de máxima produção, desde que a redução da produtividade seja mínima ao ponto de manter o retorno econômico da cultura (KANG *et al.*, 2000). E, para se quantificar a produtividade da cultura em função de vários níveis de um insumo, utiliza-se uma curva de produtividade, a qual é determinada por uma função de resposta (FRIZZONE, 1993). Desta forma, estudos para quantificar a lâmina de irrigação de maior eficiência econômica permitirão definir um manejo adequado e a adoção de práticas sustentáveis e econômicas para o cultivo do milho irrigado no sertão alagoano.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar o efeito do estresse hídrico sobre o índice de clorofila do milho e determinar a lâmina econômica de irrigação para cultura na região do Sertão Alagoano.

2.2. Objetivos Específicos

- Submeter a cultura do milho a 5 lâminas de irrigação;
- Estimar a evapotranspiração real da cultura em cada tratamento;
- Realizar balanço de água no solo para cada tratamento;
- Analisar o índice de clorofila das plantas e sua relação com o estresse hídrico em cada tratamento;
- Estimar a produtividade de grãos em cada tratamento;
- Calcular a eficiência no uso da água pela cultura em cada tratamento;
- Determinar a lâmina de irrigação que proporciona o máximo rendimento físico e econômico do milho.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Aspectos gerais da cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) é um cereal, originado da América, mais especificamente com centro de origem no México, América Central ou Sudoeste dos Estados Unidos (SILVA e SILVA, 2017). É cultivado em diversos países pelo mundo, sob diferentes manejos e climas (SILVA *et al.*, 2021), sendo considerada uma das principais culturas graníferas a nível mundial, em função de seus diversos usos como a alimentação humana e animal, fabricação de diversos

produtos, como medicamentos, e produção de combustíveis, como o etanol, por exemplo (EICHOLZ *et al.*, 2020).

De acordo com dados disponibilizados pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – USDA, disponibilizados pela Federação das Indústrias do Estado de São Paulo – FIESP (2021), na safra de 2020/21 a produção de milho atingiu 1,13 bilhão de toneladas, representando pouco mais de 45% da totalidade de grãos produzidos no mundo.

Segundo Eicholz *et al.* (2020), o milho pertence ao grupo de plantas com metabolismo fotossintético classificado como C4, que se caracteriza pela ampla adaptação a diferentes ambientes e elevado potencial produtivo. Sua elevada produtividade ocorre quando a máxima área foliar coincidir com a maior disponibilidade de radiação solar, desde que não haja limitação hídrica, nutricional e por pragas (DAN *et al.*, 2010). Essa condição possibilita a máxima fotossíntese possível, entretanto, também ocorre elevação no fluxo energético incidente, aumentando a evapotranspiração e, por consequência, a necessidade hídrica da cultura.

Por ser cultivado em uma ampla faixa do globo, é esperado que haja diferença relativa na interação clima-planta no que diz respeito aos fatores que afetam a estação de crescimento e a produtividade do milho conforme as características intrínsecas a cada região de cultivo. Em decorrência disso, Silva (2013) recomenda estudos regionalizados sobre a relação planta-ambiente nas diferentes fases de desenvolvimento da cultura, com teste dos fatores de resposta da produção a fatores como as condições meteorológicas, fertilidade do solo e ciclo de produção, tendo em vista que as condições de produção durante o ciclo da cultura estão atreladas especificamente ao local e a variedade utilizada.

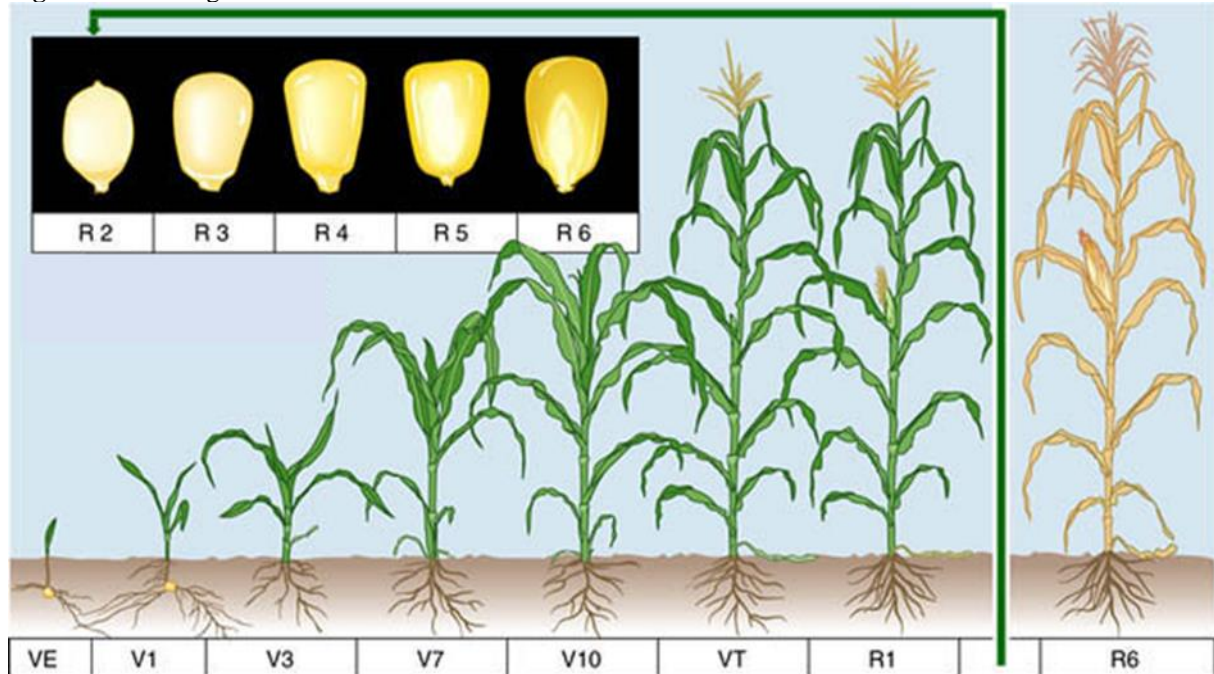
Quando se trata dos aspectos climáticos, os principais a exercerem influência sobre a cultura do milho são radiação solar, temperatura e a precipitação pluvial, os quais, interagem entre si e com o meio, interferindo diretamente nas atividades e na resposta fisiológica da planta e, conseqüentemente, na produção de matéria seca, grãos e produtividade da lavoura (EICHOLZ *et al.*, 2020).

3.2. Crescimento e fenologia do milho

O crescimento é comumente confundido com o desenvolvimento (SOARES, 2019), no entanto, enquanto o primeiro é o aumento do tamanho da planta que é potencializado por condições favoráveis, como temperatura, nutrientes, umidade adequada, entre outros fatores, o segundo é a soma de processos de crescimento e diferenciação que resultam em mudanças de

função e morfologia da planta. A fenologia, define as fases nas quais a cultura passa por essas mudanças exteriores, passando para um estágio mais avançado de desenvolvimento (PIONEER SEMENTES, 2017), durante todo o seu ciclo de vida (Figura 1).

Figura 1 – Fenologia do milho: estádios de desenvolvimento da cultura.



Fonte: Adaptado de Fancelli (1986) pela UC Produção de Produção de Cereais, Proteaginosas e Oleaginosas, FCUP.

O ciclo de produção do milho pode variar em função da variedade e do ambiente onde está inserido, com uma duração média entre 110 e 160 dias para a cultivares utilizadas no Brasil (FANCELLI, 2015). A partir de adaptações feitas nos trabalhos de Hanway (1963), Fancelli e Dourado Neto (2004) e Magalhães *et al.* (2006) dividiram o ciclo da cultura do milho em dois grupos: fase vegetativa (V) e fase reprodutiva (R), conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Estádios de desenvolvimento da cultura do milho estabelecido.

VEGETATIVO	REPRODUTIVO
V_E – Emergência	R₁ – Florescimento
V₁ – 1ª folha desenvolvida	R₂ – Grão leitoso
V₂ – 2ª folha desenvolvida	R₃ – Grão pastoso
V₃ – 3ª folha desenvolvida	R₄ – Grão farináceo
V_N – N-ésima folha desenvolvida	R₅ – Grão farináceo duro
V_T – Pendoamento	R₆ – Maturidade fisiológica

Fonte: Adaptado de Fancelli e Dourado Neto (2004) e Magalhães *et al.* (2006).

Santos (2014), usando graus-dias como fator de diferenciação entre fases, agrupou o milho cultivado em região semiárida em 4 fases de desenvolvimento, sendo elas (I) inicial, com 16 dias de duração; (II) desenvolvimento vegetativo, com 20 dias de duração; (III) floração, com 27 dias de duração; e (IV) maturação fisiológica, com 14 dias de duração, considerando 77 dias de ciclo para produção de milho verde.

O início do ciclo de desenvolvimento de milho se dá pela germinação da semente (V_0), que ocorre quando há condições de temperatura e umidade favoráveis, propiciando o desencadeamento do processo germinativo, resultando na emissão das estruturas embrionárias contidas na semente, dando início ao crescimento da planta jovem (FANCELLI, 2015). O tempo entre a semente e a germinação varia entre 3 e 15 dias, em função da temperatura a que são submetidas.

Os estádios V_1 a V_N se caracterizam pelo surgimento, desdobramento completo e crescimentos das folhas (o número da fase corresponde ao número de folhas totalmente desdobradas). No V_4 , por exemplo, ocorre a preparação para o início da diferenciação do meristema apical, que, até então se encontram abaixo da superfície do solo, por volta dos 12 a 20 dias após a emergência (DAE) da planta (FANCELLI, 2015).

Por volta dos 30 a 35 DAE a planta se encontra no estágio V_8 , cuja principal característica é o crescimento do colmo em comprimento e diâmetro, início da confirmação do número de fileiras de grãos e aceleração da formação da inflorescência masculina (EICHOLZ *et al.*, 2020).

Entre a 6ª e 7ª semana após a emergência (SAE) das sementes a planta se encontra no estágio V_{12} . Nessa fase, entre 85 e 90% de toda a área foliar da planta está definida, há uma elevada taxa de crescimento do colmo, espiga superior e pendão, além da perda de 2 a 4 folhas mais velhas. (EICHOLZ *et al.*, 2020; FANCELLI, 2015).

Caracterizado pelo aparecimento parcial do pendão e pelo crescimento acentuado dos estilos-estigma, o estágio V_T , ocorre por volta da 8ª a 9ª SAE. Com o estágio R_1 , dá-se início a fase reprodutiva das plantas, com o florescimento e a polinização entre as inflorescências masculina e feminina, entre a 9ª e a 10ª SAE (EICHOLZ *et al.*, 2020).

Após a polinização e fecundação dos estilo-estigmas, dá-se início ao crescimento e desenvolvimento dos grãos. Entre 12 e 16 dias após a fecundação (DAF) ocorre o estágio R_2 , grão leitoso, caracterizado pelo acúmulo de açúcares solúveis no endosperma dos grãos; 20 a 32 DAF as sementes atingem o estágio pastoso (R_3), onde suas estruturas embrionárias já se encontrem totalmente diferenciadas; o grão atinge estágio farináceo (R_4), entre o 32º e 40º

DAF, nessa fase há o surgimento da concavidade na parte superior do grão, conhecida como “dente”. Em R₅ (45 e 55 DAF), ocorre a acelerada perda de água em toda a planta; por fim, em R₆ (entre 50 e 65 dias após o início da polinização) os grãos atingem sua maturidade fisiológica, onde os grãos passam pela paralisação total de acúmulo de matéria seca, ao mesmo tempo em que há a senescência natural das folhas de toda a planta (FANCELLI, 2015).

3.3. Fatores que influenciam o crescimento, desenvolvimento e produtividade do milho

3.3.1. Variáveis Agrometeorológicas

O clima possui elementos decisivos para o cultivo das diversas culturas agrícolas, incluindo o milho. Esses elementos constituem as chamadas variáveis agrometeorológicas (chuva, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar, temperatura, fotoperíodo, etc.) (SILVA, 2019), os quais variam em função da localização da região de cultivo no globo, bem como das estações do ano que, por sua vez, tem origem na declinação da terra sobre seu próprio eixo, bem como no movimento de translação.

Dessa forma, é essencial o estudo dessas variáveis para o adequado manejo da cultura, haja vista a necessidade de se compreender a ordem e o nível de interferência que as variáveis agrometeorológicas podem surtir sobre o crescimento, desenvolvimento e produtividade do milho.

A radiação solar também afeta no ciclo de vida de seres autótrofos, haja vista a necessidade de luminosidade para o processo de fotossíntese, no qual ocorre a conversão de energia radiante em energia química. Segundo Santos *et al.* (2018), a radiação solar atua diretamente sobre o crescimento e o desenvolvimento das plantas, e indiretamente pelos efeitos no regime térmico de qualquer sistema terrestre.

A radiação está associada a diversos processos meteorológicos e climáticos na terra, como o processo de evapotranspiração, através do aquecimento da superfície terrestre e a superfície da derme vegetal, processo esse que influencia na perda de água, nas trocas gasosas e na atividade fotossintética dos organismos autótrofos. Por se tratar de uma planta com metabolismo do tipo C₄, o milho encontra melhores condições de desenvolvimento em períodos com radiação solar mais intensa, durante sua fase de crescimento, observado esse fator de forma isolada, apresentando ponto de saturação pela luz entre 20 e 40 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (ENÉAS FILHO *et al.*, 2021).

A região de Piranhas-AL apresenta uma média anual de Radiação Global (R_g) de 20,9 MJ m⁻²dia⁻¹, onde os valores médios mais baixos são verificados entre os meses de abril e julho, que correspondem a época úmida da região, e os valores médios mais altos são

verificados entre os meses de outubro a dezembro, que correspondem a época mais seca da região (SILVA, 2021). Didonet *et al.* (2002) verificaram que, em conjunto com o fator temperatura, o número de grãos e a produtividade do milho são determinados por estes dois fatores até o espigamento e que a maior produtividade do milho é obtida em épocas de semeadura em que ocorrem as maiores relações possíveis entre a radiação solar e as temperaturas incidentes até o espigamento.

A temperatura do ar tem influência direta no crescimento e desenvolvimento dos seres vivos, influenciando no transporte de produtos metabolizados e na velocidade de reações químicas (SILVA, 2013). Por conseguinte, para a determinação do melhor manejo a ser adotado na condução do milharal, é essencial conhecer e compreender as relações entre a variedade a ser cultivada e a temperatura do ar existente na região de cultivo (ARAÚJO *et al.*, 2021).

Eicholz *et al.* (2020) aponta que, em geral, o milho responde à alta temperatura, desde que haja suficiente umidade de solo. Da emergência a floração, a temperatura considerada ideal para o desenvolvimento do milho está na faixa entre 24 e 30 °C. Durante a floração a temperatura ideal está na casa dos 26 °C, médias acima disso aceleram o desenvolvimento dessa fase, abaixo de 15,5 °C retardam. Temperaturas superiores a 35 °C podem ocasionar diminuição da atividade da redutase do nitrato, o que ocasiona alterações no rendimento e na composição proteica.

Por outro lado, na polinização, pode ocorrer redução da germinação dos grãos de pólen em temperaturas acima de 33 °C, em função da sensibilidade das estruturas (LANDU *et al.*, 2009). A média anual de temperatura para a maior parte do semiárido brasileiro está na faixa entre 24 e 28 °C, havendo variações regionais, em função de fatores adicionais como o relevo, e temporais (ao longo do ano), todavia, a temperatura não se apresenta como um fator limitante para o cultivo de milho na região (MOURA *et al.*, 2019).

Do mesmo modo, ocorre em Piranhas-AL, onde a média de temperatura é de 26,9 °C (ARAÚJO *et al.*, 2021), corroborando com Silva *et al.* (2021), os quais estudaram o efeito do déficit hídrico nas diferentes fases fenológicas do milho na região semiárida de Alagoas e verificaram que a temperatura e umidade do ar não influenciaram na limitação térmica para o desenvolvimento do milho durante todo o ciclo.

3.3.2. Demanda Hídrica da Cultura

Allen *et al.* (1998) descrevem que a relação solo-água-plantat-atmosfera se divide em dois processos desmembrados, sendo eles: (1) a evaporação, que consiste na perda de água pela superfície do solo; e (2) a transpiração, que se refere a perda de água da cultura para a

atmosfera. A união entre esses dois processos recebe o nome de evapotranspiração da cultura (ET_c). Em condições ótimas, a ET_c tem seu máximo quando o solo se encontra em sua capacidade total de água disponível (CAD) (SILVA, 2019). Todavia, em condições reais, outros fatores difíceis de serem otimizados, como ocorrência de pragas e doenças, saturação ou escassez de água e baixa fertilidade do solo, impedem a ocorrência de ET_c máxima e, assim, ela passa a ser chamada de evapotranspiração real (ET_r) (ALLEN *et al.*, 1998; SILVA, 2013).

Autores como Bergamaschi *et al.* (2014) e Hernández *et al.* (2015) apontam que a cultura do milho apresenta alta demanda por água, necessitando de 200 a 500 mm durante o ciclo de produção. Entretanto, essa demanda pode mudar em função de diversos fatores, como a diversidade de climas existentes nas diversas regiões que produzem milho.

Em Alagoas a demanda hídrica do milho que é de 225 a 304 mm na região da Zona da Mata (SILVA *et al.*, 2016), muda para 457 a 650 mm na região Semiárida (ARAÚJO *et al.*, 2021). Silva *et al.* (2021) estudando o efeito do déficit hídrico em diferentes fases fenológicas do milho na região semiárida de Alagoas, verificaram que plantas submetidas ao déficit hídrico na fase de pendoamento e floração foram menos produtivas, sofrendo com variação no número de grão por espiga.

A falta ou o excesso de água acarreta injúrias e diminuição da produtividade das plantas (TAIZ e ZEIGER, 2013). Tendo em vista as adversidades oriundas das condições climáticas das diversas regiões onde há cultivo de milho, no que diz respeito a disponibilidade hídrica, tanto em termos quantitativos, quanto na distribuição da precipitação no tempo e no espaço, o emprego da irrigação, em caráter total ou complementar, é ferramenta determinante no sucesso do cultivo e na produtividade final do milho.

Para tanto, se faz necessário conhecer a quantidade de água a ser fornecida no cultivo, bem como a adoção de manejo consciente, evitando desperdício de água e reduzindo custos na irrigação (COELHO *et al.*, 2014).

3.3.3. Relação da clorofila com o déficit hídrico

O déficit hídrico é um dos fatores limitantes de produção de maior destaque, uma vez que pode prejudicar as relações hídricas das plantas, provocando alterações metabólicas, de forma progressiva, sob condições de estresse hídrico ou de baixa disponibilidade de nitrogênio (SILVA, 2019). Com a redução do teor de água na planta, há também a redução de potencial hídrico foliar e perda de turgidez, fechamento estomático e redução do crescimento celular (JALEEL *et al.*, 2009).

O déficit hídrico dificulta a absorção do nitrogênio, componente essencial das clorofilas, as quais são responsáveis pela captação da energia solar e pela produção de fotoassimilados nas plantas (MACHADO *et al.*, 2004). Por sua vez, a deficiência de N oriunda da dificuldade de absorção em virtude do estresse hídrico, reduz a área foliar, acelerando o processo de senescência foliar, reduzindo a eficiência do processo de fotossíntese na planta.

Em resumo, quanto maior o período de submissão da planta de milho ao estresse hídrico, maior será a dificuldade de absorção de N, com menor produção de clorofilas, maior redução de área foliar, menor eficiência e quantidade de energia solar absorvida, menor produção de fotoassimilados e, potencialmente, menor será a produtividade do cultivo.

A clorofila absorve radiação com diferentes comprimentos de onda, estando o pico de absorbância situado na região entre os comprimentos correspondente às cores vermelha e azul, com baixa absorbância na região do verde (cor refletida) e extremamente baixa na região do infravermelho. Em função disso, as medições do índice de esverdeamento da folha são realizadas na faixa do infravermelho e vermelho, onde a absorbância é alta e não é afetada pelos carotenóides (HENDRY & PRICE, 1993).

A espectrofotometria é uma das técnicas disponíveis para proceder com determinação do conteúdo de clorofila foliar. Todavia, esse método é demorado e destrutivo (Amarante *et al.*, 2010), e a eficiência da extração está atrela a uma série de fatores variáveis, tais como a habilidade do técnico e do solvente orgânico que estão sendo usados no procedimento. Dessa maneira, métodos alternativos, como por exemplo o uso de medidor portátil, são mais procurados por apresentarem diversas vantagens, tais como a simplicidade, rapidez (leituras instantâneas) e confiabilidade do processo (SILVA, 2019).

3.3.4. Irrigação no cultivo do milho

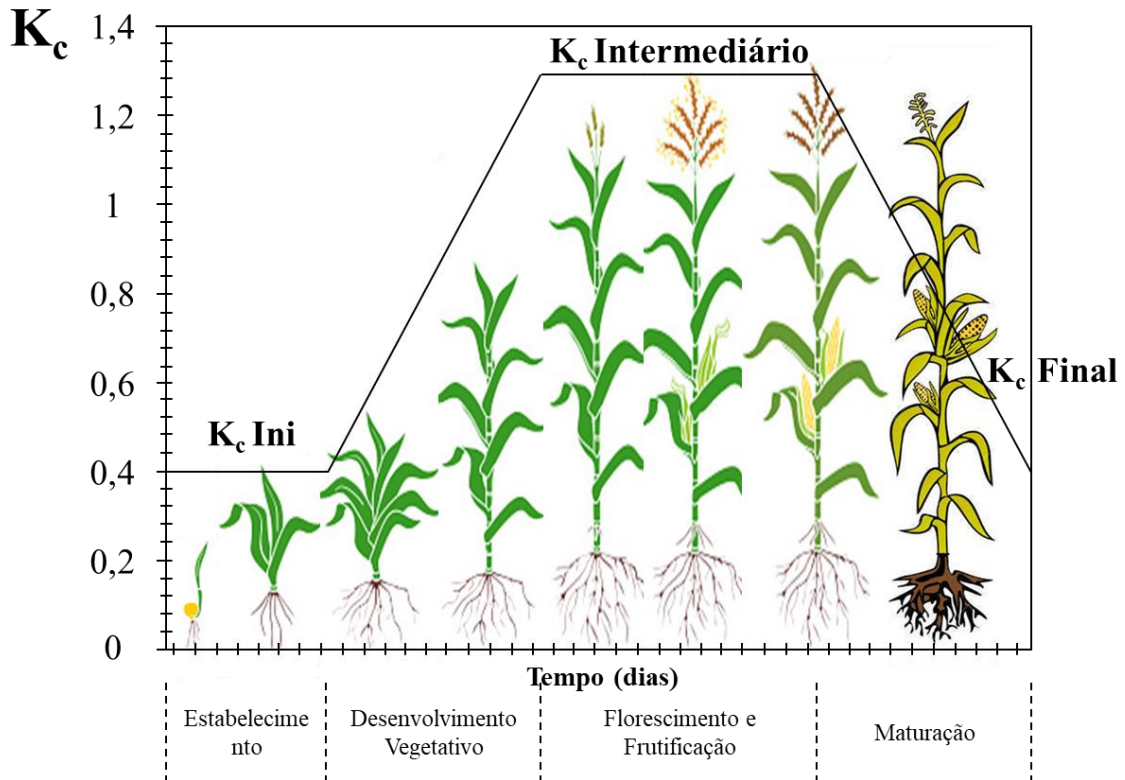
Na agricultura, a irrigação é uma técnica que deve ser utilizada não somente para suprir a deficiência hídrica em períodos de estiagem, mas também para permitir e subsidiar condições para a expressão máxima do potencial genético em campo, no que diz respeito ao fator hídrico (SILVA, 2013). Ainda assim, a água é um recurso cada vez mais limitado para as diversas atividades humanas principalmente em regiões onde esse recurso é naturalmente escasso, especialmente para o emprego na produção de alimentos. Desse modo, torna-se cada vez mais essencial o desenvolvimento de pesquisas que possibilitem o emprego de técnicas que permitam aumentar a produtividade das culturas a cada unidade de volume de água aplicado (SANTOS, 2012).

Ao mesmo tempo, concomitante com o desenvolvimento de estratégias de irrigação, é de suma importância conhecer o efeito da deficiência hídrica em cada estágio de desenvolvimento das plantas. De acordo com Enéas Filho *et al.* (2021), na planta, tanto o crescimento quanto o desenvolvimento e a translocação de fotoassimilados encontram-se ligados à disponibilidade hídrica do solo. Consequentemente, em condições de déficit hídrico, a produtividade de grãos é substancialmente afetada, sendo os estágios de pendoamento, florescimento e enchimento de grãos considerados as fases mais críticas da cultura (SILVA *et al.*, 2021).

Entre os sistemas de irrigação mais utilizados no cultivo de milho destaca-se a irrigação localizada, que apresenta vantagens como maior eficiência no uso da água (EUA), baixo consumo energético, melhor distribuição de adubos via fertirrigação e melhor manutenção da umidade do solo (OLIVEIRA *et al.*, 2020), sempre próximo a capacidade de campo; como desvantagem podem ser citados, entre outros fatores, o desenvolvimento radicular limitado, concentração de zona úmida, sensibilidade a obstrução dos emissores e o elevado custo de investimento inicial (SILVA, 2013).

Para a determinação do volume água necessário para ser aplicado via irrigação é necessário levar em consideração às condições hídricas do solo e ao consumo de água pela planta, que varia conforme o desenvolvimento da mesma. Para essa finalidade, o cálculo da ET_c e do armazenamento de água no solo em função dos elementos climáticos é simples e prático (ARAÚJO *et al.*, 2021). De acordo com Allen *et al.* (1998), a precisão do método de cálculo da ET_c é definida pela escolha do método da estimativa do coeficiente da cultura (K_c), onde, para escalas de tempo que variam de uma semana a intervalos maiores recomenda-se o método de K_c único (Figura 2).

Figura 2 – Estimativa de K_c único ao longo do crescimento da planta de acordo com o boletim FAO 56.



Fonte: Adaptado de Allen *et al.* (1998).

3.3.5. Eficiência no Uso da Água (EUA)

Utilizada por pesquisadores do mundo inteiro, a eficiência no uso da água (EUA) é uma relação para determinar a quantidade de matéria prima produzida por unidade de água consumida pela planta. Pode ser expressa em várias unidades de medidas, sendo as principais o quilograma de produto por metro cúbico de água (kg m^{-3}) e a megagrama (tonelada) de matéria prima por megalitro de água (Mg ML^{-1}), que equivale a $10^{-2} \text{ t ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ que é igual a kg m^{-3} ou a 100 mm t^{-1} (SILVA, 2013). Araújo *et al.* (2018) avaliando a cultura do milho submetido a três turnos de rega no Semiárido Alagoano verificaram que o tratamento com maior EUA apresentou uma média de $17,3 \text{ kg mm}^{-1}$.

3.4. Função resposta e produtividade de máxima eficiência econômica

Soares *et al.* (2020) discorre que, em razão do cálculo da lâmina diária de água através da estimativa da ET_c não permitir a determinação do rendimento agrícola, se faz necessário um ajuste de modelo matemático, que permite uma adequada representação do comportamento da planta de milho em resposta ao fator de avaliação, lâminas aplicadas. Isso se deve ao fato de que essa metodologia permite estimativa do nível de rendimento a ser obtido em função da lâmina total que se pretende aplicar.

Santos *et al.* (2020), reforçam que a escolha da melhor lâmina a ser aplicada não deve se restringir unicamente a maior produção física em função do uso da água, sendo necessário analisar outros fatores, como disponibilidade hídrica e energética, bem como indicadores de produtividade da água usados para avaliar, estrategicamente, a exploração agrícola de água em condições de escassez. Dessa forma, a metodologia desenvolvida por Frizzone (1993) permite uma determinação mais adequada de máxima produtividade física e econômica da cultura, levando em consideração na análise econômica de produção, fatores como o preço de venda da saca de milho no mercado de destino e preço do milímetro de água (SILVA *et al.*, 2018).

4. METODOLOGIA

4.1. Descrição da área experimental

O experimento foi conduzido no Instituto Federal de Alagoas/Campus Piranhas (9°37'22.7"S; 37°46'03.4"W) (Figura 3). A classificação climática da região, segundo Köppen, é do tipo BSh, Tropical semiárido (LIMA, 1977), a época chuvosa tem início em março, se estendendo até julho, com precipitação pluvial média anual de 492,2 mm (SANTOS *et al.*, 2017). A classificação do solo foi feita por Sousa *et al.* (2010) e as características físicas estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características físicas do solo¹ e classificação realizada por Sousa *et al.* (2010).

Características Físicas	Resultados
Tipo de solo	Luvissolo Crômico
Textura	franco argilosa
Densidade volumétrica (g m ⁻³)	1,19
Porosidade total (%)	55
θ_{CC} (cm ³ cm ⁻³)	0,2131
θ_{PMP} (cm ³ cm ⁻³)	0,1172
θ_{CAD} (cm ³ cm ⁻³)	28,77

¹O solo foi coletado na área do experimento e a análise física foi realizada no laboratório da UFCG.

Fonte: Sousa (2010) e Araújo (2022).

Figura 3 – Mapa e imagem de satélite do IFAL – Campus Piranhas, localizado na cidade de Piranhas-AL, destacando a área do experimento (quadro com borda amarela).

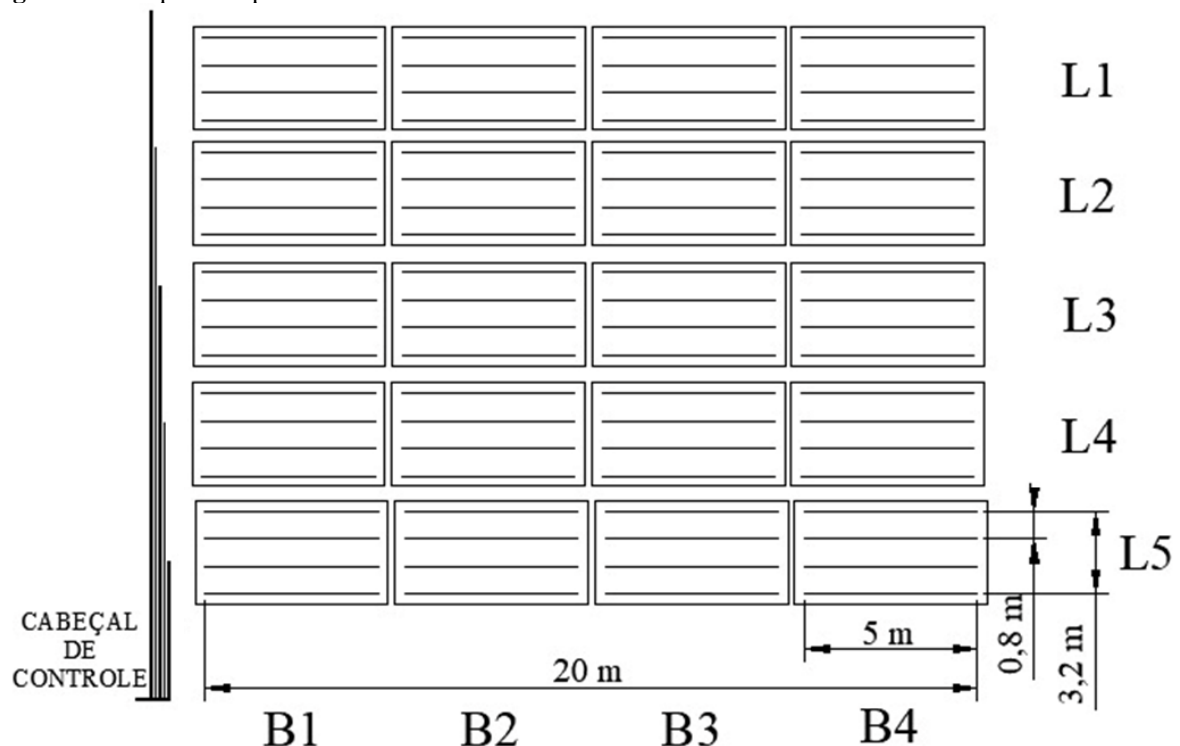


Fonte: Google Maps, adaptado por Araújo (2022).

4.2. Delineamento, tratamentos e unidade experimental

O delineamento experimental utilizado foi em esquema de faixas com quatro repetições. Os tratamentos foram cinco lâminas de irrigação (40, 80, 120, 160 e 200% da ETc). As parcelas foram compostas por 4 fileiras de 5,0 m de comprimento espaçadas a 0,80 m, resultando numa área total de 16 m², sendo que a área útil foi composta pelos 3 m centrais das duas linhas do meio, totalizando a área de 352 m² para execução do experimento.

Figura 4 – Croqui do experimento.



Fonte: Araújo (2022).

4.3. Instalação e condução do experimento

A coleta para análise do solo (Tabela 2) foi realizada após o preparo de solo via gradagem. Foi utilizado o híbrido de milho transgênico AG7088 PRO3, cujo plantio (Figura 5A) foi feito em sulcos abertos manualmente, colocando-se duas sementes a cada 0,20 m, e quando as plantas atingiram o estágio 1, com as 4 folhas totalmente expandidas, foi feito o desbaste para uma planta, resultando numa população de 62.500 plantas por hectare.

Figura 5 – Plantio manual na área experimental (A) e adubação de plantio, para composição dos tratamentos com cinco níveis de irrigação durante o ciclo de produção do milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.



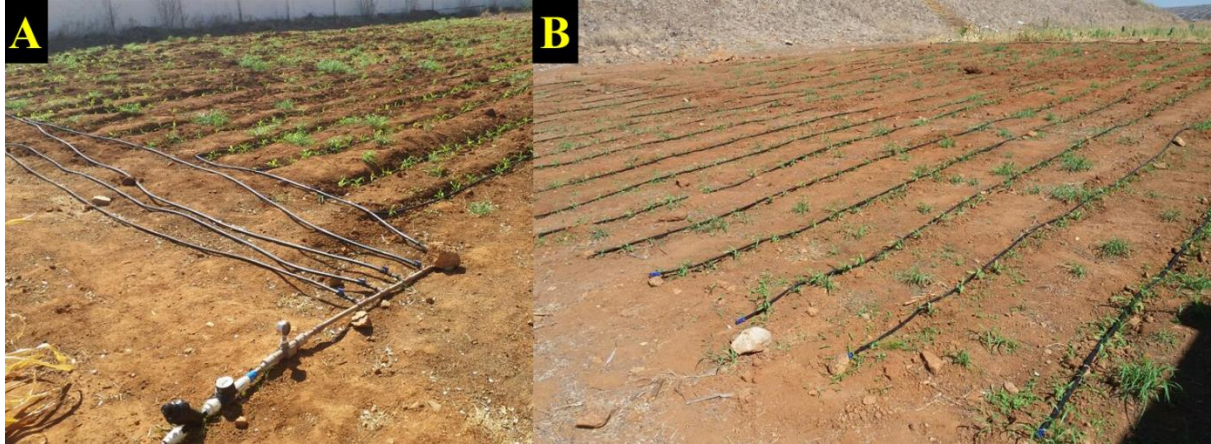
Fonte: Araújo (2022).

A adubação (Figura 5B) foi realizada em função da produtividade esperada de 10 t ha⁻¹, de acordo com Coelho (2007). Para isso, foram aplicados no plantio 77,8 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato simples, mais metade do potássio (100 kg ha⁻¹ de K₂O) na forma de cloreto de potássio. A segunda metade do potássio foi aplicada em cobertura aos 21 dias após a semeadura (DAS), mais 50 kg ha⁻¹ de nitrogênio na forma de sulfato de amônio, parcelado aos 21, 36 e 56 DAS. O controle de pragas e doenças foi feito através do Manejo Integrado de Pragas e Doenças (MIPD) com catações manuais e inseticida químico à base demetomil na dose de 0,6 L ha⁻¹ nas fases de crescimento vegetativo (22 DAS) e na fase de floração (50 DAS), enquanto o controle de plantas espontâneas foi realizado através de capinas manuais e herbicida à base de glifosato na dose de 2,6 L ha⁻¹.

4.4. Irrigação

A irrigação foi feita via sistema de gotejamento com vazão nominal de 7,5 L h⁻¹m⁻¹ (Figura 6), pressão nominal de 10 mca e espaçamento entre gotejadores de 40 cm. O manejo da irrigação foi realizado com turno de rega diário e manutenção da umidade do solo próximo à capacidade de campo. Nos primeiros 16 dias após a semeadura (DAS) todos os tratamentos foram irrigados de forma a não causar déficit hídrico à cultura. Após esse período, as lâminas de irrigação foram diferenciadas conforme os tratamentos. O controle das lâminas foi realizado mediante aferição de curva de vazão x pressão dentro do tempo de operação do sistema.

Figura 6 – Cabeçal de controle (A) e sistema de irrigação (B) montados na área experimental, para composição dos tratamentos com cinco níveis de irrigação durante o ciclo de produção do milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.



Fonte: Araújo (2022).

4.5. Variáveis agronômicas

A partir dos dados coletados nas plantas durante a condução do experimento, foram realizadas as seguintes etapas: determinação da produtividade em cada tratamento, avaliação do efeito do déficit hídrico sob o índice de clorofila das plantas em cada tratamento, estimativa da ETr e verificação da eficiência do uso da água em cada tratamento e determinação da lâmina econômica de cultivo. A determinação da produtividade foi feita através do peso médio dos grãos coletados de espigas na fase de maturação fisiológica, na ocasião da colheita e, através dos dados de rendimento dos grãos e da ETr, foi determinada a eficiência no uso da água pela cultura (EUA) em quilogramas por milímetro (kg mm^{-1}).

As leituras dos índices de clorofila total (a+b) foram realizadas aos 63, 77 e 91 dias após a semeadura com uso do equipamento clorofiLOG® Falker (Figura 7). As leituras do teor de clorofila se basearam nas propriedades óticas das folhas e foram feitas com o clorofilômetro ClorofiLOG® modelo CFL 1030 (Falker Automação Agrícola, Brasil), que fornece valores chamados Índice de Clorofila Falker (ICF) proporcionais à absorbância das clorofilas (FALKER, 2022). Esses cálculos são feitos com base na absorção de luz em comprimentos de onda característicos da clorofila. O clorofiLOG® mede a quantidade de radiação transmitida através das folhas, de forma óptica, em três diferentes comprimentos de onda, dois na faixa do vermelho, próximos aos picos de absorção da clorofila ($\lambda=635$ e 660 nm) e um no infravermelho próximo ($\lambda=880$ nm). A combinação destes valores de transmitância nestes três comprimentos de onda gera o ICF – Índice de Clorofila Falker.

Figura 7 – Medição do Índice de Clorofila Falker (ICF) com clorofilômetro ClorofiLOG® modelo CFL 1030 (A) e detalhe do efeito das lâminas de irrigação na coloração das folhas de milho (B) para os tratamentos com cinco níveis de irrigação durante o ciclo de produção do milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.



Fonte: Araújo (2022).

A análise do índice de clorofila seguiu a metodologia descrita por Silva (2019), onde foram utilizadas cinco plantas na linha central da parcela e em cada planta foram realizadas medições nos terços superior, médio e inferior a mais ou menos 1,5 cm da margem da folha +3, sendo posteriormente obtida a média geral das diferentes partes da folha. As medições ocorreram entre as 10h e 14h para reduzir o efeito da variação de irradiância nas leituras do clorofilômetro durante as horas do dia.

4.6. Variáveis agrometeorológicas

Foram processadas e analisadas as seguintes variáveis meteorológicas: precipitação pluvial, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar e temperatura do ar, obtidas numa estação automática de aquisição de dados pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e localizada no Centro Xingó de Convivência com o Semiárido (1,25 km de distância).

A evapotranspiração de referência (ET_o) e o balanço de água no solo foram calculados com base na metodologia do boletim FAO-56 (Food and Agriculture Organization of the United Nations), descrita por Allen *et al.* (1998).

4.7. Função resposta e produtividade de máxima eficiência econômica

A função de resposta da cultura às lâminas de irrigação foi obtida por curvas de regressão polinomial quadrática com a variável independente (lâmina) de acordo com a Equação 1:

$$Y = b_0 + b_1x - b_2x^2 \quad (1)$$

Em que: Y – é a produtividade agrícola (kg ha^{-1}); x – é a lâmina de irrigação total aplicada; b_0 , b_1 e b_2 – são os coeficientes de ajuste da equação.

A equação utilizada para estimar a lâmina de irrigação que proporcionou a produtividade máxima foi deduzida igualando-se a zero a primeira derivada da função de produção (Equação 1), conforme as Equações 2 e 3.

$$Y' = b_1 - 2b_2x \therefore b_1 - 2b_2x = 0 \therefore -2b_2x = -b_1 \quad (2)$$

$$X_{m\acute{a}x} = \frac{b_1}{2b_2} \quad (3)$$

Em que: $X_{m\acute{a}x}$. – é a lâmina de irrigação que proporciona a máxima produtividade agrícola (kg ha^{-1}).

Posteriormente, a produtividade máxima ($Y_{m\acute{a}x}$, em kg ha^{-1}) foi estimada substituindo-se x por $X_{m\acute{a}x}$ na Equação 1.

Para se fazer a análise econômica da produção utilizou-se os custos de produção e o preço de venda do produto. Os custos foram divididos em custos fixos (custo operacional de produção de milho mais o custo inicial com a irrigação de 153 mm, a qual foi feita em todos os tratamentos, e custo variável (lâmina de irrigação de cada tratamento). Esses valores foram utilizados no cálculo da Margem de Contribuição Agrícola (receita líquida), a qual foi expressa por:

$$MCA = P_y Y - (P_x + C_{op} + C_L) \quad (4)$$

Em que: MCA é a margem de contribuição agrícola, R\$; P_y é o preço da saca de milho, R\$ saca^{-1} ; P_x é o preço do fator água, R\$ mm^{-1} ; C_{op} é o custo operacional de produção de milho, R\$; C_L é o custo com a lâmina de irrigação inicial, R\$.

O preço de venda para fins de cálculo foi constituído de três valores padronizados devido à variação da cotação durante as safras, para que possam ser usados como comparativos em tomadas de decisões administrativas.

Tabela 3 – Custo do milímetro de água para irrigação por gotejamento na cultura do milho.

Descrição	R\$ ha ⁻¹ ciclo ⁻¹	R\$ mm ⁻¹	%
Infraestrutura hidráulica/Edificações (amortização em 20 anos - 60 ciclos)	65,90	0,12	5,0
Sistema de irrigação (amortização em 4 anos - 12 ciclos)	981,84	1,71	74,5
Custo operacional da irrigação por ciclo	270,17	0,47	20,5
Custo total da irrigação por ciclo	1.317,90	2,30	100

Operação do sistema de irrigação durante 3 ciclos de produção por ano.
Lâmina média por ciclo: 573 mm

Fonte: Google Shopping (31/01/2022), adaptado por Araújo (2022).

Tabela 4 – Cenários de cotação da saca (60 kg) e do kg de milho, fevereiro de 2022, utilizados na análise econômica.

Descrição	R\$ saca ⁻¹	R\$ kg ⁻¹
Cotação Mínima	30,00	0,50
Cotação atual verificado no mercado	80,00	1,33
Cotação Máxima	130,00	2,17

Fonte: Agrolink (2022), adaptado por Araújo (2022).

A lâmina de irrigação de máxima eficiência econômica foi estimada pela Equação 4:

$$X_{ec} = \frac{P_x - P_y b_1}{2P_y b_2} \quad (4)$$

Em que: X_{ec} – é a lâmina de irrigação que proporciona a produtividade ótima econômica (kg ha⁻¹); P_x – é o custo médio do mm de água (R\$ mm⁻¹); P_y – é o preço de venda do kg de milho (R\$ kg⁻¹); b_1 e b_2 – são os coeficientes da função de produção;

Posteriormente, a produtividade de máxima eficiência econômica foi estimada substituindo-se x por X_{ec} na Equação 1.

4.8. Análises estatísticas

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F e teste de regressão polinomial para verificar o grau de diferença estatística entre os tratamentos.

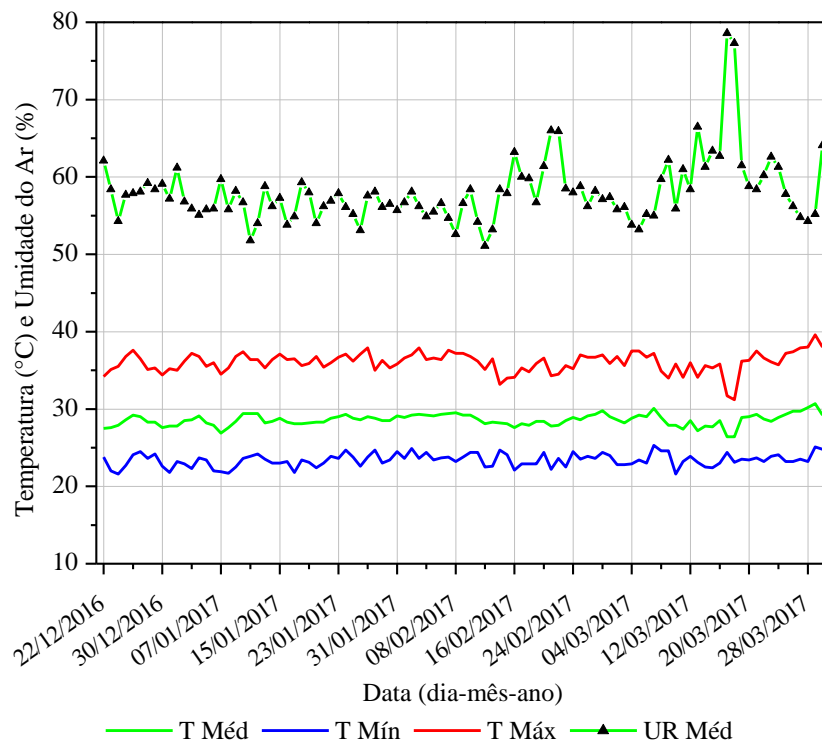
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Variáveis Agrometeorológicas

A umidade relativa média diária do ar (UR mín) (Figura 8) na região de Piranhas, Semiárido Alagoano, no período de 22 de dezembro de 2016 a 30 de março de 2017, variou de 51,1 % (10 de fevereiro de 2017) a 78,6% (17 de março de 2017) com média de 58% (Figura 3). Silva *et al.* (2021) avaliando o efeito do déficit hídrico diferentes fases fenológicas do milho

na região semiárida de Alagoas, verificaram que a temperatura e umidade do ar não influenciaram na limitação térmica para o desenvolvimento do milho durante todo o ciclo, evidenciado. Também é possível observar que na metade final do mês de março (fim do verão e início do outono no hemisfério sul), ocorre um declínio na temperatura máxima e média e elevação no vapor d'água presente na atmosfera em decorrência da redução da intensidade solar, resultado do fim da declinação solar causada pelo movimento de translação da terra em torno do sol, que, durante o verão, mantém a temperatura e energia disponível elevados, atenuando a nebulosidade, favorecendo a entrada de raios solares.

Figura 8 – Umidade relativa e temperatura do ar diária durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.



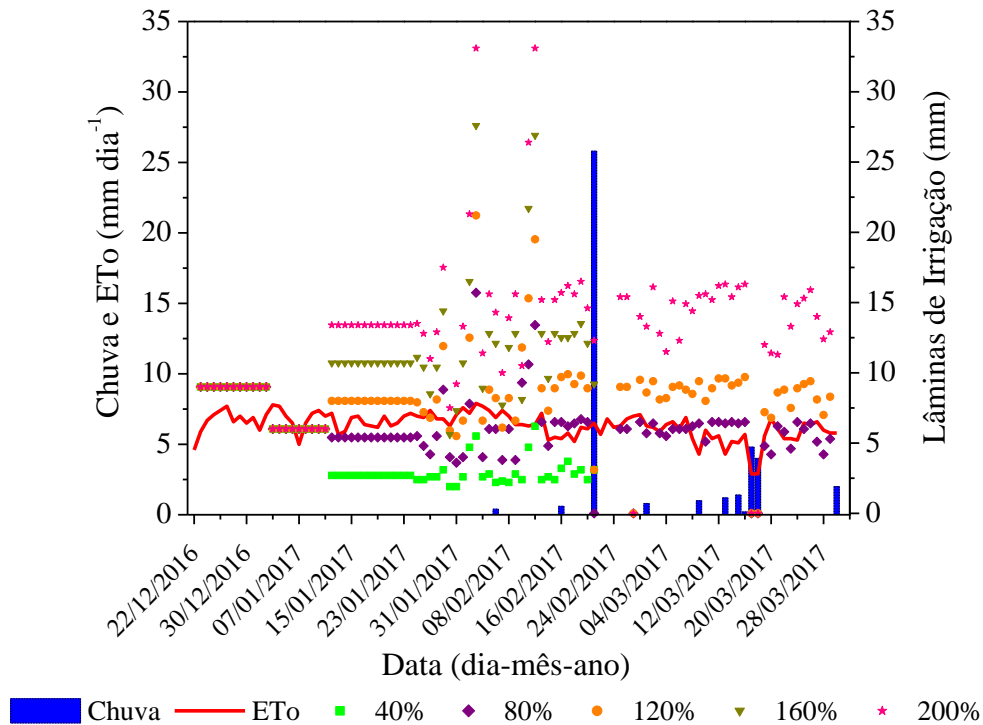
Fonte: Araújo (2022).

A temperatura mínima diária do ar (T mín) oscilou de 21,6 °C (10 de março de 2017) a 25,3 °C (07 de março de 2017), com média de 23,4 °C (Figura 3). A temperatura máxima (T máx) esteve entre 31,2 °C (18 de março de 2017) e 39,6 °C (29 de março de 2017), com média de 36 °C. A temperatura média do ar (T méd) variou entre 26,4 °C (18 de março de 2017) e 30,7 °C (29 de março de 2017), com média geral de 28,6 °C (Figura 8), em consonância com Eicholz *et al.* (2020), os quais relatam que temperaturas médias dentro do intervalo ótimo de 24 a 30 °C, propiciam crescimento máximo da cultura.

A precipitação pluvial durante o ciclo de produção da cultura (de 22 de dezembro de 2016 a 30 de março de 2017 – 98 dias) somou 42,2 mm. A chuva mais intensa do período

ocorreu em 21 de fevereiro, quando se registrou 25,8 mm dia⁻¹ (61,1%), apresentando intensidade variável e distribuição irregular, características da pluviosidade de regiões semiárida (Figura 9). A média pluviométrica anual de Piranhas é de 492,2 mm, com estação chuvosa concentrado nos meses de abril, maio e junho (SANTOS *et al.*, 2017).

Figura 9 – Distribuição de chuva, evapotranspiração de referência (ET₀) e lâminas de irrigação diárias (lâmina comum a todos os tratamentos na fase inicial e L1, L2, L3, L4 e L5 nas fases de crescimento, intermediária e final) durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.



Fonte: INMET (2016/17); Araújo (2022).

A evapotranspiração de referência (ET₀) total no ciclo de produção foi 628,1 mm (Figura 9) – com mínima diária de 2,9 mm (17 e 18 de março de 2017, quando houve chuva de 4,8 e 4 mm, respectivamente), máxima de 7,9 mm dia⁻¹ (03 de fevereiro de 2017) e média diária de 6,3 mm (Figura 4). Durante o ciclo, os valores de ET₀ mais elevados ocorreram entre dezembro e janeiro, resultado da baixa umidade relativa do ar e da alta temperatura (UR méd de 51,8% e T máx de 37,9 °C em 27 de janeiro de 2017), além da maior radiação solar, que fizeram aumentar a demanda de água da atmosfera nesse período.

A irrigação foi manejada em turno de rega diário e, nos primeiros 16 dias após a semeadura (DAS), todos os tratamentos foram irrigados de forma a não causar déficit hídrico à cultura, totalizando 129 mm (cerca de 6 a 9 mm por evento) nos tratamentos de L1 a L5, para garantir boa emergência e desenvolvimento inicial. As lâminas de irrigação diferenciadas foram aplicadas a partir dos 17 DAS, ou seja, no mês de janeiro, quando houve declínio do armazenamento de água no solo e aumento da evapotranspiração da cultura. Os valores médios

diários estimados para as lâminas líquidas foram 3, 5, 8, 11 e 13 mm em L1, L2, L3, L4 e L5, respectivamente.

5.2. Balanço de Água no Solo e Evapotranspiração da Cultura

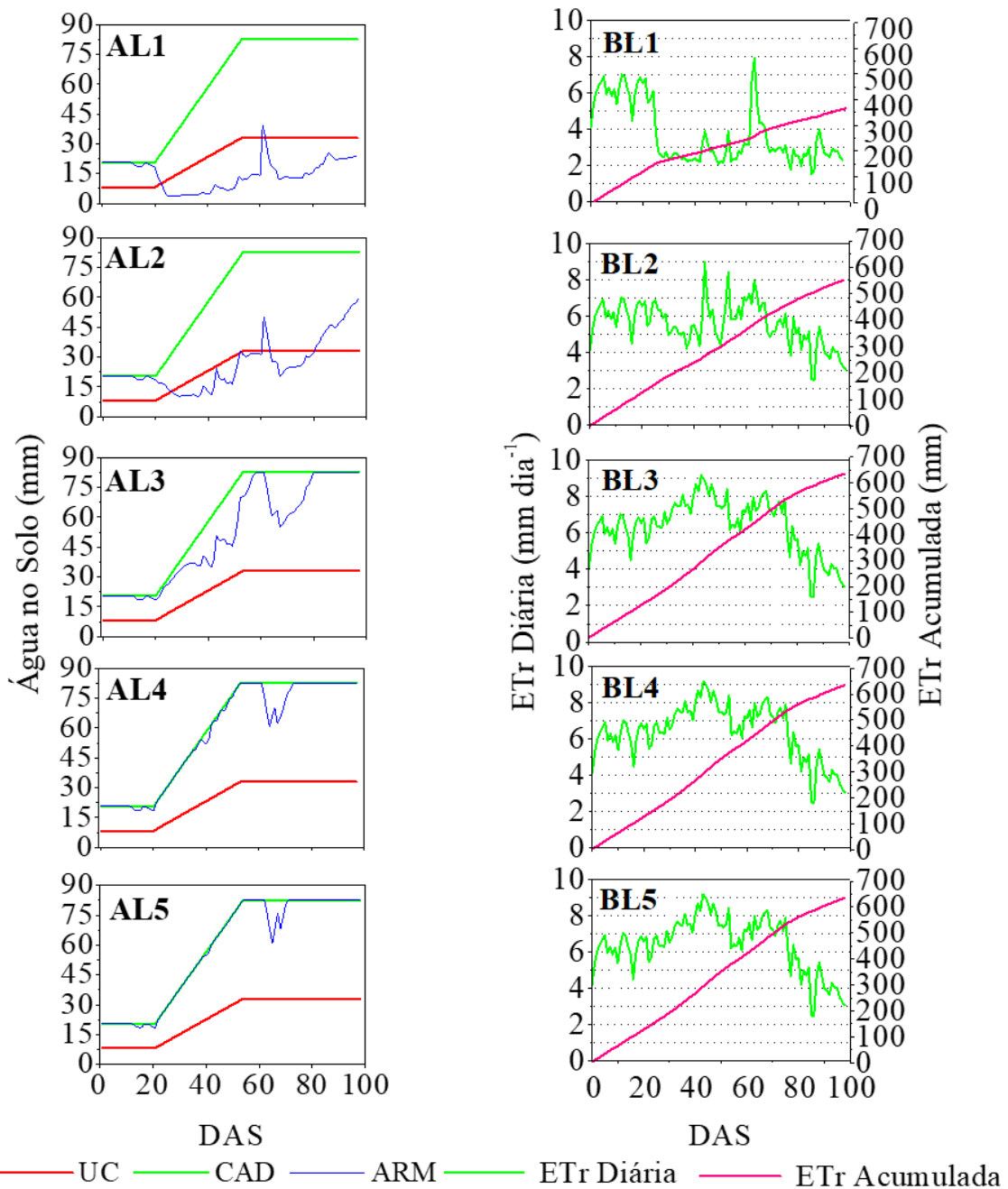
Neste trabalho, o cálculo do armazenamento de água no solo (ARM) foi feito considerando uma profundidade máxima da raiz de 40 cm. No primeiro dia do ciclo de produção da cultura (1 DAS) o valor do ARM foi considerado igual ao da capacidade de água disponível devido à alta lâmina de água aplicada no plantio, pois essa é a condição inicial para a simulação ($ARM = CAD$), conforme a Figura 10A. Todo o ciclo da cultura (98 dias, de 22 de dezembro de 2016 a 30 de março de 2017) coincidiu com o período seco da região, que vai de agosto a março. Durante o período seco acontecem as chamadas “chuvas de verão”, que ocorrem esporadicamente, com intensidade no tempo e no espaço muito variáveis. Isso afetou os tratamentos que recebem lâminas inferiores à ET_c (L1 e L2), deixando a cultura com armazenamento abaixo da umidade crítica ($ARM < UC$) após o início da aplicação das lâminas diferenciadas.

Nos primeiros dias após o início da aplicação das lâminas diferenciadas (a partir de 17 DAS), nos tratamentos L1 e L2, o ARM foi diminuindo gradualmente devido ao consumo de água pela cultura, chegando ao ponto de ficar abaixo da UC, atingindo o intervalo entre a UC e o ponto de murcha permanente (PMP) – que compreende a água indisponível para a absorção pela planta – ocasionando estresse hídrico na cultura. Uma vez que a saída de água foi maior que a entrada, em L1 (40% da ET_c), o ARM se manteve abaixo da UC durante quase todo o ciclo de cultivo, subindo para zona de água facilmente disponível (AFD, compreendida entre a CAD e a UC) somente em 21 de fevereiro de 2017 (fase de florescimento), em decorrência de um evento de precipitação ocorrido na data (25,8 mm), voltando a ficar abaixo da UC até o final do ciclo.

O mesmo ocorreu com o tratamento L2 que, após o início das lâminas diferenciadas, manteve o ARM igual ou abaixo da linha de UC até em 21 de fevereiro (chuva de 25,8 mm, na fase de florescimento), devido ao consumo da planta, voltou a ficar abaixo da UC durante 19 dias, quando, a ocorrência de uma sequência de eventos de precipitação de baixa intensidade (1,2, 1,4, 4,8 e 4 mm), possibilitou a elevação do ARM para o intervalo de AFD para a planta até o final do ciclo de cultivo. Nesse período que compreendeu a fase de florescimento e enchimento de grãos (40 dias, 20 de fevereiro a 30 de março de 2017), em L2, a ET_r média diária foi de 5,04 mm dia⁻¹, 10% abaixo da demanda máxima da cultura (ET_c de 5,6 mm dia⁻¹).

Isso ocorreu porque a água de irrigação foi aplicada na zona da raiz e direcionada para a transpiração, ficando apenas uma pequena fração para ser evaporada durante essa fase, fazendo diminuir a ETr. Nos tratamentos L3, L4 e L5 (120, 160 e 200% da ETc, respectivamente), no decorrer de todo o ciclo da cultura (98 dias), observou-se que o ARM nunca esteve menor que o limite da AFD, ou seja, a cultura não sofreu estresse hídrico por déficit. Esse resultado é decorrente da aplicação de lâminas maiores que a demanda máxima da cultura.

Figura 10 – Umidade crítica (UC), capacidade de água disponível (CAD) e Armazenamento de água no solo (ARM) (A). Evapotranspiração real da cultura diária (ETr) e acumulada (ETr Acumulada) (B), para os tratamentos com cinco níveis de irrigação durante o ciclo de produção do milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.



Fonte: Araújo (2022).

No decorrer da fase de crescimento (11 de janeiro a 4 de fevereiro de 2017) a CAD apresentou tendência crescente e variou em torno 20,6 a 80,6 mm entre os 20° e 44° DAS, respectivamente. Essa alteração também foi observada no limite da AFD (UC), a qual variou de 8,3 mm a 33 mm. Esse aumento está relacionado com a capacidade de absorção de água em função do crescimento da raiz, a qual nos primeiros dias se concentrou nos primeiros 20 cm de profundidade e no decorrer do ciclo de produção atingiu cerca de 40 cm de profundidade efetiva, associado a influência do crescimento da parte aérea da cultura, que proporcionou o aumento na taxa de transpiração, elevando a demanda hídrica e a absorção de água a maiores profundidades.

Durante o ciclo de cultivo a ETr variou de 1,5 a 7,9 mm, com média de 3,7 mm dia⁻¹ e acúmulo de 365,87 mm para L1; para L2 houve acúmulo de 552,1 mm e oscilação entre 2,5 e 9 mm, média de 5,6 mm dia⁻¹; com acúmulo de 634,7 mm, L3, L4 e L5 variaram sua ETr entre 2,5 e 9,2 mm e média de 6,4 mm dia⁻¹ (Figura 10B). Os tratamentos L1 e L2, por receberem entradas de lâminas inferiores às lâminas evapotranspiradas permaneceram durante quase todo o ciclo de cultivo em situação de déficit hídrico, como consequência do baixo volume de água armazenada no solo em camadas superiores a linha de UC, a disponibilidade hídrica para evaporação e absorção pela cultura (e perdas por transpiração) foi restringida, implicando em valores baixos de ETr acumulada, quando comparados aos tratamentos que receberam lâminas que atendiam a ETc.

Ao comparar a ETr da fase intermediária com a da fase final, observou-se que todos os tratamentos apresentaram curvas mais crescentes no período intermediário que no final (Figura 10B). Por exemplo, no tratamento L1 (40% da ETc) a ETr média diária e acumulada na fase final foram 2,6 mm dia⁻¹ e 60,6 mm em 24 dias, respectivamente, e na fase intermediária esses valores foram 3,3 mm dia⁻¹ e 103,8 mm em 31 dias. No tratamento L4, com 160% da ETc, os valores de ETr média diária e acumulada na fase final foram 4,5 mm dia⁻¹ e 108,8 mm, respectivamente. E na fase intermediária esses valores foram 7,5 mm dia⁻¹ e 232,2 mm. Isso ocorreu porque durante a fase intermediária ocorreu a chuva de maior lâmina precipitada durante o ciclo de cultivo (25,8 mm) que permitiu a elevação do armazenamento de água no solo em todos os tratamentos, especialmente nos de menor lâmina (L1 e L2) que estiveram por maior tempo em estado de déficit hídrico.

A elevação do armazenamento, na prática, permitiu que a cultura estivesse com mais água disponível para absorção, implicando no aumento das taxas de ETr desses tratamentos. Na fase final, por efeito da maturação da cultura, houve a senescência de parte das

folhas, o que reduziu a transpiração, deixando o solo mais exposto e aumentando a evaporação. Todavia, as perdas por evaporação ainda foram insuficientes para fazer com que a ETr diária da fase final fosse maior ou igual a ETr diária da fase intermediária.

As lâminas totais de irrigação diferenciadas variaram entre os tratamentos de 230,4 a 1.080,3 mm, ficando os tratamentos L4 e L5 abaixo dos percentuais da ETc estabelecidos (Tabela 5). A ETc total durante o período de aplicação das lâminas diferenciadas foi de 550,5 mm.

Tabela 5 – Valores totais de irrigação, percentagem da ETc atingida pelas lâminas e evapotranspiração total da cultura (ETc) para os tratamentos com cinco níveis de irrigação durante o ciclo de produção do milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.

Tratamentos	Lâminas de irrigação (mm)	% da ETc atingida	ETc (mm)
L1 (40% ETc)	230,4	42%	550,5
L2 (80% ETc)	452,1	82%	
L3 (120% ETc)	658,3	120%	
L4 (160% ETc)	874,0	159%	
L5 (200% ETc)	1.080,3	196%	

Fonte: Araújo (2022).

5.3. Índice de Clorofila

A avaliação fisiológica realizada nas fases de florescimento e maturação das plantas apresentou efeito significativo para as variáveis analisadas ao nível de 1% de probabilidade de erro (Tabela 6), havendo efeito das lâminas de irrigação sobre a resposta da clorofila, em que os dados foram ajustados à regressão polinomial.

Tabela 6 – Resumo da análise de variância pelo teste de Tukey para o Índice de Clorofila Falker (IFC) para Clorofila Total, durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.

FV	GL	63' DAS	77 DAS	91 DAS
		----- QM -----		
Bloco	3	11,78 ^{ns}	67,5 ^{ns}	376,43 ^{ns}
Lâmina	4	1.894,23 ^{**}	1.659,11 ^{**}	1.306,34 ^{**}
Erro	72	69,23	38,93	167,57
CV (%)		14,96	10,88	27,25
Média		55,61	57,35	47,5

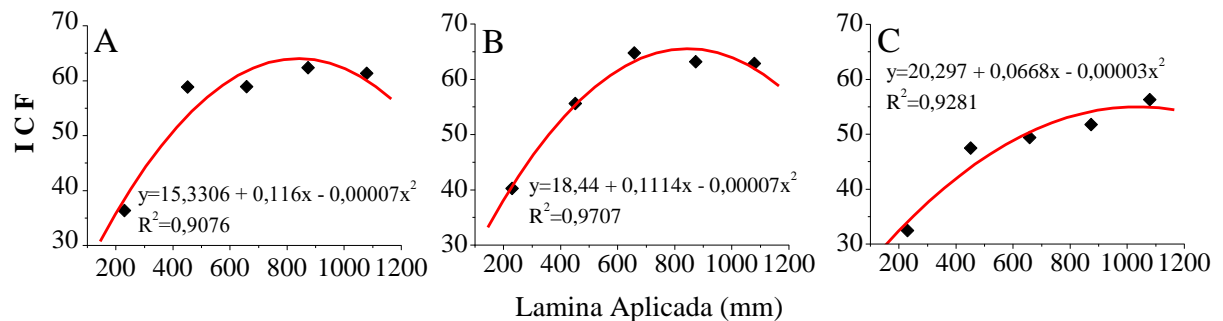
** significativo ($p \leq 0,01$), ns (não significativo) pelo teste de F e DAS (dias após a semeadura).

Fonte: Araújo (2022).

As lâminas de irrigação em milímetros de água aplicada foram de 230, 452, 658, 874 e 1.080 nos tratamentos L1, L2, L3, L4 e L5, respectivamente, e promoveram ajuste quadrático sobre o teor de clorofila (Figura 11). O Índice de Clorofila Falker (ICF), nos teores

totais (soma dos pigmentos a+b), variou entre 36,3 (L1) e 62,3 (L4) para a primeira época (63 DAS), 40,2 (L1) e 64,7 (L3) para a segunda época (77 DAS) e de 32,4 (L1) a 56,3 (L5) para a terceira época (91 DAS), evidenciando, para as três épocas, o efeito deletério do menor suprimento hídrico sobre a clorofila da planta, a qual reduziu, em média, na medida em que se aproximou da maturação fisiológica. Nascimento *et al.* (2016), avaliando o efeito do estresse hídrico sobre a produção de espigas verdes de milho, e Silva (2019), avaliando o efeito de lâminas de irrigação, épocas de plantio e doses de nitrogênio sobre índices fisiológicos e econômicos do milho, encontraram resultados semelhantes.

Figura 11 – Índice de Clorofila Falker (ICF) para clorofila total (pigmentos a+b) de milho submetido a cinco lâminas de irrigação (230, 452, 658, 874 e 1.080 mm) aos 63 (A), 77 (B) e 91 (C) dias após a semeadura, durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.



Fonte: Araújo (2022).

Küster *et al.* (2017) apontam que o déficit hídrico é uma condição abiótica que expressa à falta de água no ambiente afetando a morfofisiologia das plantas, tendo como sintomas evidentes a clorose, ou amarelamento, no qual ocorre degradação das clorofilas e exposição dos carotenoides. Santos *et al.* (2012) salientam que a degradação da clorofila pode ocasionar uma considerável redução na taxa fotossintética e, conseqüentemente, uma redução na produtividade.

No que diz respeito à intensidade da coloração de plantas sob estresse hídrico, Silva *et al.* (2016) explicam que a ocorrência de deficiência hídrica favorece a síntese de espécies reativas de oxigênio (EROs), que perturbam o metabolismo vegetal, dentre outras razões, por estimularem a oxidação dos pigmentos fotossintéticos. Têm sido verificado decréscimos nos teores de clorofila em plantas sob estresse hídrico, o que pode ser enquadrado como um indício inerente de estresse oxidativo, sendo, possivelmente, implicação de foto-oxidação dos pigmentos, associados à própria degradação das moléculas de clorofila.

5.4. Análise Econômica e Eficiência no Uso da Água

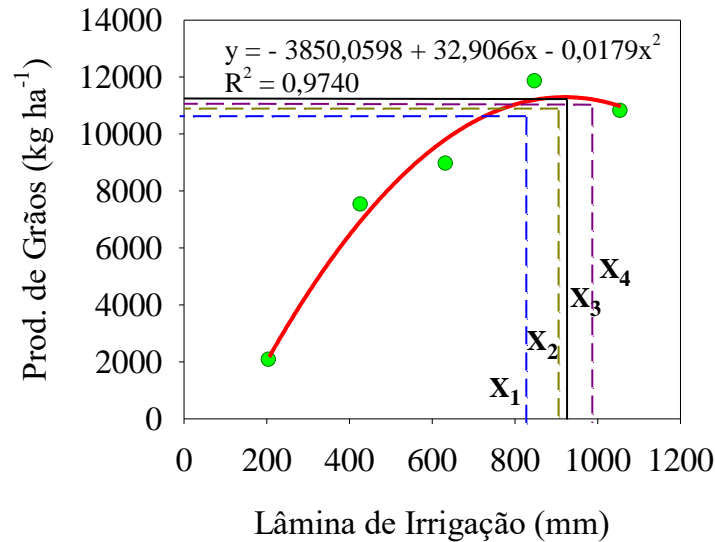
A cultura apresentou produtividade crescente em função do aumento das lâminas de irrigação, atingindo ponto de máximo na região próxima à L4, seguida de decréscimo na região de L5, constituindo uma curva de resposta bem ajustada pelo modelo polinomial de segundo grau com R^2 de 97,4%, coeficiente bem significativo (Figura 12). O tratamento L4 produziu quase cinco vezes a mais que L1, em que a produtividade agrícola do milho em função da lâmina total de irrigação variou de 2.052 a 11.833 kg ha⁻¹ em L1 (40% da ETc) e L4 (160% da ETc), respectivamente.

O tratamento L5 teve produtividade menor que L4, comportamento que está de acordo com a lei dos rendimentos decrescentes, desenvolvido por Carl Sprengel em 1828 e, posteriormente, popularizado por Von Liebig em 1840, que corresponde à análise da resposta pelo princípio agrônômico conhecido como “lei do mínimo”, que diz que “o rendimento de qualquer colheita é governado por qualquer mudança na quantidade e qualidade do fator escasso, chamado fator mínimo. E, na medida em que o fator mínimo é aumentado, a produtividade também aumenta proporcionalmente à oferta daquele fator até que outro fator se torne mínimo”. No caso em que ocorre superoferta do fator, a cultura tende a ter como resposta a redução a produtividade ao atingir sua zona de estresse por excesso.

A Figura 12 mostra que a produtividade máxima física (PMF) da cultura, estimada pela função de produção, foi de 11.267 kg de grãos por hectare com 919,2 mm (X3), os quais estiveram acima do limite da demanda hídrica máxima da cultura (ETc = 550,5 mm). É possível constatar que a produtividade máxima foi atingida com lâmina superior à ETc, o que, a princípio, se mostra incoerente, uma vez que esta representa a demanda hídrica máxima da cultura. Todavia, a regulação da absorção de água pela planta é feita por seu mecanismo de transpiração, o qual possui maior velocidade que a taxa de absorção pela raiz e condução no xilema (SILVA, 2019).

Dessa maneira, a constatação de que a aplicação de uma lâmina de irrigação superior a demanda transpirométrica propicia maior resposta em produtividade dá-se porque a taxa de transpiração é limitada pela umidade relativa do ar ou potencial hídrico atmosférico e atinge valores mais elevados quando há máxima abertura estomática, o que também permite maior entrada de CO₂ e, por consequência, maior produção de fotoassimilados para a formação e enchimento de grãos, desde que haja disponibilidade suficiente de água no solo para manter a condutância estomática sempre no máximo.

Figura 12 – Produtividade de grão em função das lâminas totais efetivas (chuva efetiva + irrigação efetiva) aplicadas durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.



Os pontos na curva de Produtividade de Grãos marcados com X₁ (Máx_{ec1}: 790,7 mm = 10.971,93 kg ha⁻¹), X₂ (Máx_{ec2}: 871 mm = 11.225,91 kg ha⁻¹) e X₄ (Máx_{ec3}: 889,5 mm = 11.251,73 kg ha⁻¹) referem-se aos cálculos das lâminas econômicas para os preços de grão de milho iguais a 0,83; 1,33 e 1,83 R\$ kg⁻¹, respectivamente; X₃ é o ponto de máxima produtividade física pela função de produção (Máx_{física}: 919,2 mm = 11.267,46 kg ha⁻¹); Custo do milímetro de água: R\$ 2,30.

Fonte: Araújo (2022).

A máxima eficiência econômica (Máx_{ec}) foi determinada em função de três diferentes cenários de cotação do preço da saca de milho (Tabela 7), os quais propiciaram a formação de três pontos de Máx_{ec}. Em Máx_{ec1} foram produzidas 10.971 kg de grãos por hectare com um total de 790,7 mm líquidos de irrigação, correspondentes a 153,6% da ET₀, em que o preço do quilograma de milho foi R\$ 0,83. Em Máx_{ec2} foram produzidas 11.225 kg ha⁻¹ com um total de 871 mm líquidos de irrigação, correspondentes a 169,3% da ET₀, em que o preço do quilograma de milho foi R\$ 1,33. Já em Máx_{ec3} foram produzidas 11.251 kg de grãos por hectare com um total de 889,5 mm líquidos de irrigação (172,8% da ET₀), em que o preço do milho foi R\$ 1,83 kg⁻¹.

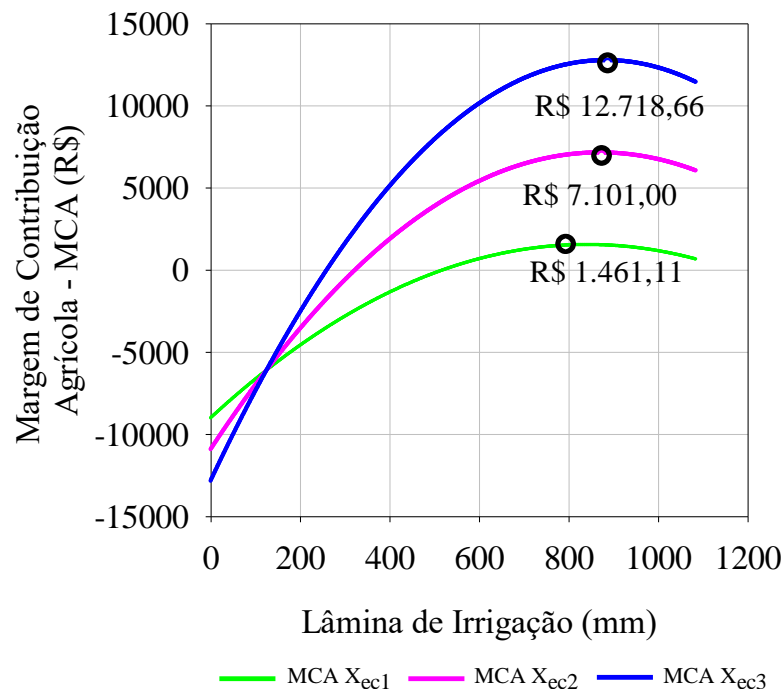
Tabela 7 – Valores de lâmina máxima econômica e produtividade econômica para diferentes preços de venda de da saca de milho (60 kg) cultivado com irrigação durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.

Preço da saca (R\$)	Lâmina máxima econômica (mm)	Produtividade máxima econômica (kg ha ⁻¹)
50	790,7	10.971
80	871,0	11.225
110	889,5	11.251
Lâmina máxima (mm)		Produtividade máxima física (kg ha⁻¹)
919,2		11.267

Fonte: Agrolink (2022), adaptado por Araújo (2022).

A Margem de Contribuição Agrícola (MCA) esteve crescente nos 3 cenários até ao ponto Má_x_{ec}, quando atingiu seu máximo de R\$ 1.461,11, R\$ 7.101 e R\$ 12.718,66 por hectare, em Má_x_{ec1} Má_x_{ec2} Má_x_{ec3}, respectivamente (Figura 13). Desse ponto em diante tornou-se decrescente. A partir das lâminas 525, 326 e 262 mm, para as cotações R\$ 50,00, R\$ 80,00 e R\$110,00, respectivamente, a MCA se torna positiva, indicando a viabilidade econômica da produção em função dessas lâminas econômicas. Como as produtividades econômica e de máxima eficiência econômica dependem do preço do grão, pode-se diminuir ou aumentar a lâmina econômica de irrigação se o valor da saca de milho diminuir ou aumentar.

Figura 13 – Margem de Contribuição Agrícola (MCA) na produção de grãos em função das lâminas totais efetivas (chuva efetiva + irrigação efetiva) aplicadas durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.

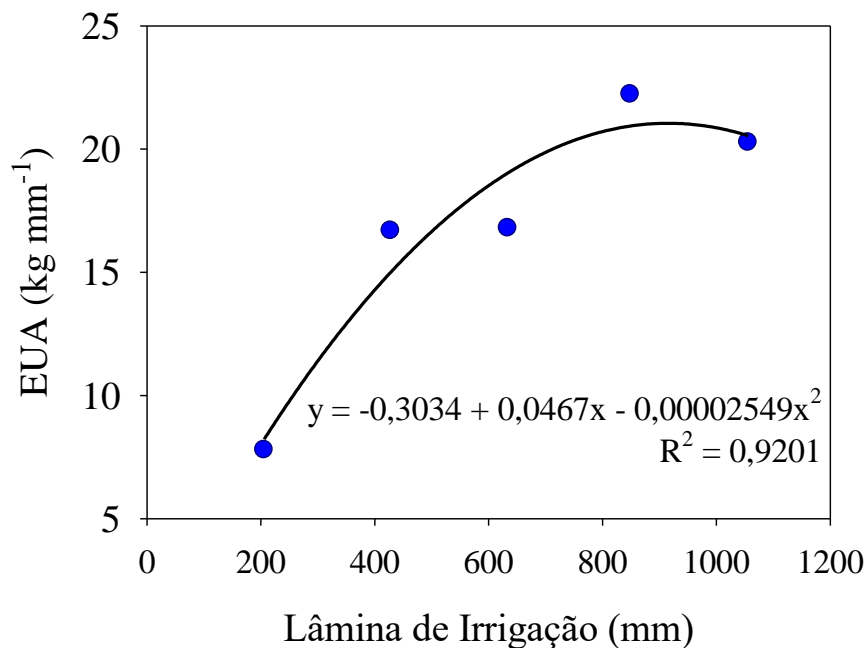


Fonte: Araújo (2022).

O cálculo da remuneração pelo uso de insumos na agricultura engloba diversos fatores que nem sempre podem ser controlados, especialmente quando se trata de fatores ambientais (bióticos e abióticos). Em vista disso, trabalhos como este apoiam e auxiliam os processos de tomada de decisões administrativas, desde que respeitadas condições básicas de compatibilidade de cenários, como, por exemplo, semelhança de clima e solo às do local onde foi realizada a pesquisa. Ademais, questões econômicas como preços de commodities e insumos estão propensas a alterações diárias, ficando a critério do administrador examinar a melhor solução e selecionar a alternativa mais compensatória para o uso de determinados insumos.

A Figura 14 apresenta a eficiência do uso da água (EUA, em kg mm^{-1} de água) em função das lâminas d'água totais efetivas aplicadas no cultivo de milho, na qual é possível verificar o comportamento crescente da curva de EUA na medida em que mais água foi disponibilizada, até atingir o ponto de máximo, quando, na sequência, houve um decréscimo na eficiência do uso da água. A equação foi ajustada pelo modelo polinomial de segundo grau, com R^2 de 92%. A EUA teve média geral igual a $16,75 \text{ kg mm}^{-1}$ ($68,5 \text{ mm t}^{-1}$) e variou de $7,8 \text{ kg mm}^{-1}$ (consumo de $128,5 \text{ mm t}^{-1}$) no tratamento irrigado com 40% da ETc (L1) a $22,2 \text{ kg mm}^{-1}$ (45 mm t^{-1}) no tratamento com 160% da ETc (L4), indicando uma redução de consumo por tonelada de grãos produzida, o que aumenta a EUA.

Figura 14 – Eficiência no Uso da Água (EUA) na produção de grãos em função das lâminas totais efetivas (chuva efetiva + irrigação efetiva) aplicadas durante o ciclo de produção de milho, na região de Piranhas, Semiárido Alagoano.



Fonte: Araújo (2022).

A maior EUA ($22,2 \text{ kg mm}^{-1}$) foi obtida com lâmina total efetiva de 874 mm no tratamento L4. Isso aconteceu porque o milho utilizado no experimento é um híbrido (AG7088 PRO3) que apresentou elevada resposta de conversão das lâminas em produtividade. Todavia, verificou-se que o tratamento L5 (200% da ETc), manifestou rendimento inferior ao L4, resultado que corrobora com Silva *et al.* (2018) que, cultivando milho irrigado com níveis de água entre 40 e 200% da ETc, também constataram que a EUA diminuiu com o aumento da quantidade de água aplicada por irrigação quando o estresse por excesso de água é convertido em redução de produtividade.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Índice de Clorofila Falker (IFC) apresenta relação direta com o suprimento hídrico fornecido, em que o aumento do fornecimento de água proporciona incremento da clorofila nas plantas até determinando limite, reduzindo com o excesso de água aplicada.

Diante os cenários de cotação do preço da saca de milho utilizados neste trabalho, a lâmina econômica é de 525, 326 e 262 mm para os cenários R\$50,00, R\$ 80,00 e R\$ 110,00, respectivamente.

O nível econômico de irrigação por gotejamento para milho na região de Piranhas, Semiárido Alagoano, com cultivares de potencial genético semelhante ao utilizado neste experimento está em torno de 160% da ET_c, como qual é possível obter produtividades de grãos acima de 11 t ha⁻¹.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGROLINK, Cotações de Produtos Agrícolas em Barreiras – BA. 2022. Disponível em: <<https://www.agrolink.com.br/regional/ba/barreiras/cotacoes>>. Acesso em: 02 de fev. 2022.

ALLEN, R. A.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. Roma: **FAO (Irrigation and Drainage Paper, 56)**, 1998.

ALMEIDA, A. C. S.; BONIFÁCIO, J.; PUSCH, M.; OLIVEIRA, F. C.; GESEINHOFF, L. O.; BISCARO, G. A. Produtividade e eficiência de uso da água em milho cultivado com diferentes estratégias de manejo hídrico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** Fortaleza, v.11, n.3, p.1148-1457, 2017.

AMARANTE, C. V. T.; STEFFENS, C. A.; SANGOI, L.; ZANARDI, O. Z.; MIQUELOTO, A.; SCHWEITZER, C. Quantificação de clorofilas em folhas de milho através de métodos ópticos não destrutivos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.9, n.1, p.39-50, 2010.

ARAÚJO, E. R.; SILVA, S.; SILVA, C. S.; SOUZA, J. E.; SOUSA, A. C. P.; TEODORO, I. Balanço sazonal de água no solo para manejo da irrigação de milho no semiárido de Alagoas. **Revista Verde**, v.16, n.3, p.253-258, 2021. DOI: 10.18378/rvads.v16i3.8015.

ARAÚJO, E. R.; SOUZA, J. E.; SILVA, C. S.; SOUSA, A. C. P.; SILVA, S. Balanço de água no solo para o milho submetido a turnos de rega em região semiárida. In: CONADIS-Congresso Nacional da Diversidade do Semiárido, 2018, Natal-RN. Anais do I CONADIS, 2018.

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

COELHO, A. M. **Manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. (Circular técnica, 96).

COÊLHO, M. R.V. **Alterações fisiológicas e metabólicas em *hyptis fruticosa* salzm. ex. benth e *ocimum gratissimum* L. sob diferentes regimes hídricos**. 2014. p.87. Dissertação (Mestrado em Recursos Genéticos Vegetais) – Universidade Federal de Feira de Santana, Feira de Santana, 2014.

DAN, H. A.; CARRIJO, M. S.; CARNEIRO, D. F.; COSTA, K. A. P.; SILVA, A. G. Desempenho de plantas sorgo granífero sobre condições de sombreamento. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.32, n.4, p.675-679, 2010. DOI: 10.4025/actasciagron.v32i4.5508

DIDONET, A. D.; RODRIGUES, O.; MARIO, J. L.; IDE, F. Efeito da radiação solar e temperatura na definição do número de grãos em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.933-938, 2002.

EICHOLZ, E.D.; BREDEMEIER, C.; BERMUDEZ, F.; MACHADO, J. R. A.; GARRAFA, M.; BISPO, N. B.; AIRES, R. F. **Informações técnicas para o cultivo do milho e sorgo na região subtropical do Brasil: safras 2019/20 e 2020/21**. Embrapa Clima Temperado-Livro técnico (INFOTECA-E), p.13, 2020.

ENÉAS FILHO, J.; MIRANDA, M. R. A.; SILVEIRA, J. A. G. **Fisiologia vegetal: fotossíntese**. Centro de Ciências: Departamento de Bioquímica e Biologia Molecular. Apostila Unidade V – Fotossíntese. Universidade Federal do Ceará – UFC, p.102-141, 2021. Disponível em: <http://www.fisiologiavegetal.ufc.br/aulas_pdf_pg.htm>. Acesso em: 11 set. 21.

FALKER, Automação agrícola. Manual do medidor eletrônico de teor clorofila (ClorofiLOG/CFL 1030). Porto Alegre, 2022. 33p. Disponível em: <<http://www.falker.com.br>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

FANCELLI, A. L. e DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. 4ª Ed., Livro ceres Piracicaba, 2004, p.360.

FANCELLI, A. L. **Manejo baseado na fenologia aumenta eficiência de insumos e produtividade**. Visão Agrícola, v.13, n.1, p.24-29, 2015.

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

FIESP (Federação das Indústrias do Estado de São Paulo). Safra Mundial de Milho 2020/21: 9º Levantamento do USDA. **Informativo janeiro de 2021**, 2021. Disponível em: <<file:///C:/Users/edmai/Downloads/file-20210113140121-boletim milho janeiro 2021.pdf>>. Acesso em 12 fev. 22.

FRIZZONE, J. A. **Funções de resposta das culturas à irrigação**. Série Didática, 6, p.43. Piracicaba: ESALQ/USP, 1993.

HANWAY, J. J. Growth Stages of Corn (*Zea mays*, L.). In: **Journal Paper N° J – 45-46** of the Iowa Agricultural and Home Economics Experiment Station, Ames, Iowa. Project n°. 1516, 1963.

HENDRY, G. A. F.; PRICE, A. H. Stress indicators: chlorophylls and carotenoids. In: HENDRY, G. A. F., GRIME, J. P. (eds.) **Methods in comparative plant ecology**. London: Chapman e Hall, p.148-152, 1993.

HERNÁNDEZ, M.; ECHARTE, L.; DELLA MAGGIORA, A.; CAMBARERI, M.; BARBIERI, P.; CERRUDO, D. Maize water use efficiency and evapotranspiration response to N supply under contrasting soil water availability. **Field Crops Research**, v. 178, n.1, p.8-15, 2015.

JALEEL, C. A.; MANIVANNAN, P.; WAHID, A.; FAROOQ, M.; AL-JUBURI, H.J.; SOMASUNDARAM, R.; PANNEERSELVAM, R. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. **International Journal of Agricultural Biology**, Faisalabad, v. 11, p. 100–105, 2009.

KÜSTER, M.; VARGAS, M. V. M.; ANUNCIACÃO, R. R.; VICTORIA, F. D. C. Avaliação preliminar de teor de clorofila em *Physcomitrium acutifolium* broth. (Funariaceae) sob estresse hídrico. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 9, n. 2, 2017. Disponível em: <https://guri.unipampa.edu.br/uploads/evt/arq_trabalhos/13406/seer_13406.pdf>. Acesso em 23 jan. 2022.

LIMA, I. F. **Fundamentos geográficos do meio físico do Estado de Alagoas**. Maceió: Série Estudo de Regionalização, Maceió, v.3, 1977. p. 93.

MACHADO, R.; DURAES, F.; RODRIGUES, J.; MAGALHAES, P.; CANTAO, F. **Análise de fluorescência da clorofila em linhagens de milho contrastantes para tolerância a seca submetidas a dois níveis de nitrogênio**. In: Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 25 Simpósio Brasileiro sobre a Lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda*, 1., 2004, Cuiabá, MT. da agricultura familiar ao agronegócio: tecnologia, competitividade e sustentabilidade: resumos expandidos. Sete Lagoas: ABMS: Embrapa Milho e Sorgo; Cuiabá: Empaer, 2004.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da produção de milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPS, p.10, (Embrapa-CNPMS. Circular Técnica, 76), 2006.

MOURA, M. S. B.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; SILVA, T. G. F. **Aspectos meteorológicos do Semiárido Brasileiro**, cap.2, p.85-104, 2019. In: XIMENES, L. F.; SILVA, M. S. L.; BRITO, L. T. L. (Ed). **Tecnologias de convivência com o Semiárido brasileiro**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2019. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1112124>>. Acesso em: 15 dez. 2021.

NASCIMENTO, F. N.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; RIBEIRO, V. Q. Parâmetros fisiológicos e produtividade de espigas verdes de milho sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.14, n.2, p.167-181, 2016. DOI: 10.18512/1980-6477/rbms.v14n2p167-181.

OLIVEIRA, M. H. R.; Sousa, A. E. C.; ÁVILA, E. A. S.; OLIVEIRA, R. S.; SILVA, R. M.; VENTURA, M. V. A. Produtividade da cana-de-açúcar sob irrigação localizada: uma revisão sistemática. **Research, Society and Development**, v.9, n.7, p.1-22, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i7.3966.

SANTOS, B. C.; PERUSSI, R.; DIEGO, N. B.P.; SOUZA, P. H. Agricultura Sintrópica na Bacia do Ribeirão do Feijão: uma proposição a partir dos balanços hídrico e energético na Região. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v.28, n.53, p. 443-466, 2018. DOI: 10.5752/P.2318-2962.2018v28n53p443-466.

SANTOS, D. B; FERREIRA, P. A; OLIVEIRA, F. G.; BATISTA, R. O; COSTA, A. C.; CANO, M. A. O. Produção e parâmetros fisiológicos do amendoim em função do estresse salino. **Idesia (Arica)**, v. 30, n. 2, p. 69-74, 2012. DOI: 10.4067/S0718-34292012000200009

SANTOS, D.; GUIMARÃES, V. F.; KLEIN, J.; FIOREZE, S. L; MACEDO JUNIOR, E. K. Cultivares de trigo submetidas a déficit hídrico no início do florescimento, em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.8, p.836–842, 2012. DOI: 10.1590/S1415-43662012000800004

SANTOS, G. R.; SANTOS, E. M. C.; LIRA, E. S.; GOMES, D. L.; SOUZA, M. A.; ARAÚJO, K. D. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar de Olho D'água do Casado, Delmiro Gouveia e Piranhas, Alagoas. **Revista de Geociências do Nordeste**, v.3, n.1, p.16-27, 2017.

SANTOS, M. A. L.; SANTOS, L. J. S.; SILVA, J. C.; SANTOS, D. P.; GOMES FILHO, R. R.; SANTOS, R. A. Desempenho agrônômico e análise multivariada na produção da cebolinha verde em resposta a lâminas de irrigação e níveis de adubação sintética. **Research, Society and Development**, v.9, n.12, p.1-24, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i12.11006

SANTOS, R. L. V.; BARBOSA, J. P. F.; SOUZA, W. C. L.; SILVA, L. E. B.; BRITO, D. R.; BRITO, D. B. Rendimento do híbrido de milho (*Zea mays* L.) AG 1051 sob diferentes populações de plantas em irrigação deficitária por gotejamento no Agreste Alagoano. **Revista da Universidade Estadual de Alagoas/UNEAL**, v.12, n.12, 2020.

SANTOS, Wesley de Oliveira. **Water needs, development and economic analysis of maize in the Brazilian semiarid conditions**. 2014. 104 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2014.

SILVA, A. R. A.; BEZERRA, F. M. L.; LACERDA, C. F.; SOUSA, C. H. C.; CHAGAS, K. L. Pigmentos fotossintéticos e potencial hídrico foliar em plantas jovens de coqueiro sob estresses hídrico e salino. *Revista Agro@mbiente On-line*, v. 10, n. 4, p. 317-325, 2017. DOI: 10.18227/1982-8470ragro.v10i4.3650.

SILVA, B. E. C.; SILVA, M. R. J. Viabilidade econômico-financeira da implantação da cultura do Milho no município de Santa Teresa-ES. **Revista UniVap**, v.23, n.43, p.17-25, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.18066/revistaunivap.v23i43.1773>

SILVA, S. Boletim Meteorológico de Piranhas – AL. **Boletim Técnico LIDREN** (Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia do Instituto Federal de Alagoas – Campus Piranhas), 2022.

SILVA, S.; GUIMARÃES, R. F B.; NASCIMENTO, R.; OLIVEIRA, H.; TEODORO, I.; CARDOSO, J. A. F.; BEZERRA, C. V. C.; PENHA, J. L. Economic Use of Water in Drip-

Irrigated Maize in Semi-Arid Region of Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, p. 364-369, 2018. DOI: 10.5539/jas.v10n3p364

SILVA, Samuel. **Efeito físico e econômico da água e do nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar irrigada**. Orientador: Iêdo Teodoro. 2013. 77 f. TCC (Graduação) – Curso de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2013.

SILVA, Samuel. **Índices fisiológicos e econômicos do milho sob níveis de água, nitrogênio e épocas de cultivo**. 2019. f. 76. Tese de doutorado em Irrigação e Drenagem – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3591>>. Acesso em: 29 dez. 2021.

SOARES, M. A. S. **Cultivo do milho sob diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, na região de Rio Largo, Alagoas**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, Alagoas, p. 17. 2019.

SOARES, M. A.; TEODORO, I.; SILVA, S.; CANTARELLI, A. L.; JÚNIOR, R. A.; MOURA, A. H. fenologia, componentes de produção e rendimento agrícola do milho sob lâminas de irrigação na região de Rio Largo, Alagoas. **IRRIGA**, v.25, n.2, p.279–295, 2020. DOI: 10.15809/irriga.2020v25n2p279-295.

SOUSA, I. F.; SILVA, V. P. R.; SABINO, F. G. *et al.* Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do Estado de Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.6, p.633–644, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/H7sxS5yL4Kw7TccZytV3FrF/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 nov. 2021.

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