Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Eficiência do uso da água e produtividade de biomassa do milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) sob diferentes níveis de reposição hídrica

Ailson Maciel de Almeida

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2017

Ailson Maciel de Almeida
Engenheiro Agrônomo

Eficiência no uso da água e produtividade de biomassa do milheto (*Pennisetum glaucum*
(L.) R. Br.) sob diferentes níveis de reposição hídrica
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Almeida, Ailson Maciel de

Eficiência no uso da água e produtividade de biomassa do milheto (*Pennisetum glaucum* (L.)R. Br.) sob diferentes níveis de reposição hídrica / Ailson Maciel de Almeida. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2017.

69 p.

Dissertação (Mestrado)- - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Produtividade de água 2. CWSI 3. Irrigação localizada 4. Déficit hídrico
5. Termometria por infravermelho I. Título

DEDICATÓRIA

Ao meu tio Antonio Junior Vasconcelos Maciel, o tio Junior (*in memorian*)

Pela amizade, incentivo, exemplo de força, luta pela vida e perseverança, pessoa que me
mostrou o valor da vida e da família

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me permitido caminhar aqui, nunca deixando que eu perca a minha fé.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pela acolhida e oportunidade de melhorar a minha formação acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho, pela confiança em mim depositada, incentivo e respeito durante o período de estudos na ESALQ/USP. A orientação, conselhos e convivência durante estes anos fizeram dele mais do que um professor, mas um amigo.

Ao Prof. Dr. Sérgio Nascimento Duarte, pelos conselhos, amizade e apoio durante este período de estudos, que foram muito importantes nesta fase da minha vida acadêmica. Seus conselhos e amizade foram com certeza fundamentais para a minha chegada até aqui.

Aos amigos Timóteo H. S. Barros, Asdrubal Farias, Maria Alejandra e João Paulo pela amizade, conselhos e contribuição na condução deste trabalho, que auxiliaram nos trabalhos desta dissertação, com comprometimento e dedicação e que sem os quais, teria sido muito mais difícil esta caminhada. Serei eternamente grato pelo apoio e amizade.

Aos meus colegas de orientação Nathalia Lopes, Alex Nunes, Jéfferson Costa, Marcos Amaral, Lucas Santos, Isabela e Flavio pela convivência respeitosa e companheirismo. Aos amigos de pós-graduação Débora Pantojo, Artur Carniato, Jefferson Vieira, Wagner Wolff, Wagner Ávila, Rogério Lavanholi, Jéssica Garcia, Fernanda Lamede, Luiz Sobenko, Bruno Araújo, Rony, José Leôncio, Éder Duarte, Otávio Neto, Luiz Carvalho, Yesid Mariño, Pedro Garcia, Eusímio Felisbino, Daniel Veloso e Jhonathan V. Lizcano. Aos demais amigos da pós-graduação não citados, agradeço a convivência cordial e amistosa.

Os estagiários do IF Goiano Eduardo e Giovani e à estagiária Martiliana Freire, pelo apoio e dedicação durante a condução dos trabalhos, suas contribuições foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos membros da banca de qualificação Prof. Dr. Sérgio N. Duarte, Prof. Dr. Felipe Gustavo Pilau e Prof. Dr. Fernando da Silva Barbosa, pelas compreensões e paciência durante a realização do exame, bem como, pelas contribuições, considerações e conselhos acerca deste trabalho, me fizeram crescer profissionalmente. Também agradeço aos demais professores do Departamento de Biosistemas, sobretudo, a Profa. Dra. Patrícia Angélica Alves Marques, ao Prof. Dr. Tarlei Arriel Botrel, e Prof. Dr. Fernando Campos Mendonça, pela convivência cordial e experiências compartilhadas.

Aos meus pais, Socorro Maciel e Alexandre Ribeiro, que criaram aos meus irmãos e a mim com amor, dignidade e respeito, sempre ensinando o real valor das coisas e que nada nesta vida vem por acaso. Tenho certeza que sem a educação e confiança que eles depositaram em mim ao longo destes anos, jamais teria trilhado este caminho.

Aos meus irmãos, Vanda, Vando, Alex e Edson, pela amizade e respeito, meus primeiros e eternos amigos, que me ensinaram a conviver com as pessoas e são exemplo pra mim de retidão e dignidade, agradeço pela amizade, incentivo e confiança a mim depositados, e por incondicionalmente, estarem ao meu lado.

Aos meus parentes residentes no estado de São Paulo, sobretudo, tia Madalena, tio Valmir, tia Elisângela, tia Rosinha, tio Marcelo tio Junior (*in memoriam*) e tio Jackson, sendo eles pessoas que me acolheram, acreditaram em mim e me apoiaram nesta estrada estão sempre ao meu lado, incondicionalmente.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

BIOGRAFIA

Ailson Maciel de Almeida nasceu em Garanhuns, Pernambuco, no dia 03 de outubro de 1989, criado na cidade vizinha, Paranatama, cursou o Fundamental I na Escola Estadual Narciso Correia, o Fundamental II no Colégio Municipal Dom Vital, e o ensino médio novamente na Escola Estadual Narciso Correia, concluindo o ensino médio em 2008. Em 2009, entrou na Fundação Bradesco, no curso Técnico em Agropecuária, concluindo em 2010. No mesmo ano, entrou na Universidade Federal de Pernambuco (UFRPE), na Unidade Acadêmica de Garanhuns (UAG), graduando-se em 2015, ano em que entrou para o curso de Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas da ESALQ/USP, e, dois anos depois, se submeterá ao exame de defesa do título de Mestre em Ciências, Área: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

EPÍGRAFE

A esperança tem duas filhas lindas, a indignação e a coragem; a indignação nos ensina a não aceitar as coisas como estão; a coragem, a mudá-las.

Santo Agostinho

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS.....	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1. Caracterização da espécie.....	15
2.2. Importância econômica	16
2.3. Fenologia da cultura	17
2.4. Potencial de água na folha	20
2.5. Crop Water Stress Index (CWSI)	21
2.6. Índice de área foliar	23
2.7. Produção de biomassa e produtividade de água	24
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1 Localização e caracterização da área experimental	27
3.2 Condução do experimento.....	28
3.2.1 Manejo da irrigação	28
3.2.2 Tratos culturais e manejo fitossanitário	32
3.2.3 Manejo nutricional das plantas	32
3.2.4 Aplicação de tratamentos.....	34
3.3 Monitoramento microclimático.....	35
3.4 Análise das plantas	35
3.4.1 Área foliar.....	36
3.4.2 Temperatura foliar (canhão infravermelho).....	38
3.4.3 Índice de estresse hídrico da cultura (crop water stress index – CWSI).....	38
3.4.4 Potencial de água na folha	40
3.4.5 Produção de biomassa da cultura.....	41
3.4.6 Produtividade da água para produção de biomassa da cultura.....	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 Informações micrometeorológicas	43
4.2 Manejo da irrigação.....	44
4.3 Índice de área foliar.....	46
4.4 Potencial de água na folha.....	48
4.5 Padrões de resposta termal da cultura	49
4.5.1 Temperatura foliar	49
4.5.2 Crop Water Stress Index (CWSI)	53
4.5.3 CWSI x Potencial de água na folha	54
4.6 Produção de biomassa	56
4.7 Produtividade da água para biomassa	59
5. CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS	65

RESUMO

Eficiência do uso da água e produtividade de biomassa do milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) sob diferentes níveis de reposição hídrica

O crescimento da população mundial associado ao aumento da competição pelos recursos hídricos, desafiam a humanidade a buscar alternativas para solucionar os problemas de abastecimento de água e oferta de alimentos. Isso exige de pesquisadores e institutos de pesquisa soluções para aumentar a eficiência na produção de alimentos na eficiência no uso dos recursos hídricos. O milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) pode ser uma alternativa viável para a produção de biomassa e forragem com maior eficiência no uso da água. Deste modo, levanta-se a hipótese de que a diminuição na oferta de água aumenta a produtividade da água na cultura; o objetivo deste trabalho foi investigar o incremento de produtividade da água da cultura, associado à diminuição na oferta de água, bem como, o padrão de resposta termal da cultura em função do déficit hídrico. O estudo foi conduzido em um ambiente protegido na área de pesquisa do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” entre novembro de 2016 e janeiro de 2017. A variedade utilizada neste trabalho foi a BRS-1501, desenvolvida pela EMBRAPA, o delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados com quatro blocos e quatro níveis de reposição hídrica, sendo eles: (L40, L70, L100 e L130). O nível de reposição hídrica de referência (L100) foi mantido ao longo do experimento próximo à capacidade de campo (θ_{cc}). A unidade experimental considerada foi de uma caixa com uma área de 0,261 m², com um volume de solo aproximado de 100 litros contendo seis plantas. Foram avaliados o potencial de água na folha, a temperatura foliar, para o cálculo do CWSI, e, na colheita, foi medido o índice de área foliar (IAF), e a produção de biomassa da parte aérea, para estimativa de produtividade de biomassa da parte aérea, e de água para a cultura. Os tratamentos foram aplicados aos 15 dias após a semeadura (DAS) e se seguiram até a colheita. As variáveis avaliadas apresentaram relações significativas com os tratamentos que foram impostos. O CWSI calculado para a cultura foi representativo e apresentou boa correlação com o potencial de água na folha no modelo linear. O índice de área foliar oscilou entre 5,9 m² m⁻² e 9,4 m² m⁻², em valores médios, entre os tratamentos de irrigação. O valor máximo de produtividade de biomassa seca da parte aérea se deu no tratamento L130, com valor médio de 12,1 Mg ha⁻¹, e o menor valor de produtividade de biomassa se deu no tratamento L40, com valor médio de 5,15 Mg ha⁻¹. Os valores médios de produtividade de água foram expressivos para o tratamento de reposição L40, com valor aproximado de 9,1 kg m⁻³ de biomassa produzida, evidenciando a grande eficiência no uso da água pela cultura.

Palavras-chave: Produtividade de água; CWSI; Irrigação localizada; Déficit hídrico; Termometria por infravermelho

ABSTRACT

Efficiency of water use and biomass productivity of millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) Under different levels of water replenishment

The growth of the world population associated with increased competition for water resources challenges humanity to seek alternatives to solve the problems of water supply and food supply. This requires researchers and research institutes to increase their efficiency in food production and the efficiency of their use of water resources. The millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) can be a viable alternative for the production of biomass and forage with greater efficiency in the use of water. Thus, it is hypothesized that the decrease in water supply increases the productivity of water in the crop; the objective of this work was to investigate the increase of crop water productivity, associated with the decrease in water supply, as well as the thermal response pattern of the crop as a function of the water deficit. The study was conducted in a protected environment in the research area of the Department of Biosystems Engineering of the "Luiz de Queiroz" School of Agriculture between November 2016 and January 2017. The variety used in this work was BRS-1501, developed by EMBRAPA, the experimental design was a randomized block design with four blocks and four water replenishment levels: (L40, L70, L100 and L130). The reference water replenishment level (L100) was maintained throughout the experiment close to the field capacity (θ_c). The experimental unit considered was a box with 0.261 m² containing six plants. Leaf water potential, leaf temperature, for the CWSI calculation, leaf area index (LAI) and leaf biomass production were estimated for estimating biomass productivity of aerial part, and of water for the culture. The treatments were applied at 15 days after seeding (DAS) and were followed until harvest. The evaluated variables presented significant relationships with the treatments that were imposed. The CWSI calculated for the crop was representative and showed good correlation with the leaf water potential in the linear model. The leaf area index ranged from 5.9 m² m⁻² to 9.4 m² m⁻², in average values, between irrigation treatments. The maximum productivity of dry biomass of aerial part was given in the treatment L130, with average value of 12.1 Mg ha⁻¹, and the lowest value of biomass productivity occurred in the treatment L40, with an average value of 5.15 Mg ha⁻¹. The mean values of water productivity were significant for the L40 replacement treatment, with an approximate value of 9.1 kg m⁻³ of biomass produced, evidencing the great efficiency in the use of crop water.

Keywords: Water productivity; CWSI; Localized irrigation; Water deficit; Infrared thermometry

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Local de instalação do experimento no Departamento de Engenharia de Biossistemas ESALQ/USP (a); ambiente protegido onde o trabalho foi conduzido (b).	27
Figura 2. Esquema de como foi depositado o solo em cada unidade experimental (caixa).....	28
Figura 3. Etapas do enchimento das 96 caixas: (a) alinhamento das caixas; (b) colocação de uma camada de aproximadamente 1,0 cm de pedrisco; (c) colocação de uma manta geotêxtil (bidim) acima do pedrisco; (d) preenchimento com solo até a altura de 40 cm (SCANAVINI, 2014).	28
Figura 4. Sistema de gotejamento com gotejadores autocompensantes e divisores de descarga.....	29
Figura 5. Tensiômetros instalados nas três profundidades, ilustrando as respectivas zonas. ..	29
Figura 6. Tensímetro digital utilizado nas leituras de potencial de água no solo (a) e tensiômetros instalados nas três profundidades (b).....	30
Figura 7. Coleta de solo para realização de análise química.	33
Figura 8. Croqui do experimento com quatro blocos e quatro repetições por bloco.	34
Figura 9. Componentes da estação meteorológica instalada dentro da casa de vegetação.	35
Figura 10. Folhas separadas dos caules das plantas para medição da AF (a). Integrador de área foliar de bancada LI-3100C (LICOR [®]) (b).	36
Figura 11. Área utilizada para o cálculo do índice de área foliar, considerando a projeção da copa das plantas (efeito buquê) nas parcelas.	37
Figura 12. Canhão infravermelho utilizado nas avaliações da temperatura foliar (a). Leitura d temperatura foliar (b).	38
Figura 13. Câmara de pressão de Scholander utilizada nas medições de potencial de água na folha (a). Análise do potencial hídrico foliar no milheto (b).	40
Figura 14. Variação de temperaturas máximas, mínimas e médias (a) e da umidade relativa (UR%) máxima mínima e média (b) nos meses de dezembro de 2016 e de janeiro de 2017, dentro da casa de vegetação onde foi conduzido o experimento (DAS: dias após a semeadura).	44
Figura 15. Valores de potencial mátrico (kPa) do solo em função dos dias após a semeadura (DAS) durante o ciclo do experimento.	45
Figura 16. Volume água aplicado acumulado, em litros, aplicados nos tratamentos 40, 70, 100 e 130% durante o ciclo da cultura em dias após a semeadura (DAS).....	46
Figura 17. IAF (índice de área foliar) para os tratamentos de L40, L70, L100 e L130. Letras diferentes diferem entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.....	47
Figura 18. Valores de potencial de água na folha para os tratamentos de 40, 70, 100 e 130%. Letras diferentes diferem entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.....	49
Figura 19. Imagens obtidas com câmera térmica (modelo FLIR T640) no dossel do milheto (a) Nível de reposição hídrica de 40% (L40), (b) Nível de reposição hídrica de 70% (L70) (c) Nível de reposição hídrica de 100% (L100) (d) Nível de reposição hídrica de 130% (L130). O	

alvo representa a temperatura medida no pixel, e está representando a temperatura foliar medida no ponto amostrado.....	52
Figura 20. Valores temperatura foliar amostrados no dia 04 de janeiro de 2017 (37 DAS), para os níveis de reposição hídrica de 40, 70, 100 e 130%. Letras diferentes diferem entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.	53
Figura 21. CWSI estimado para a cultura do milho. Letras diferentes diferem no teste de Tukey a 5% de probabilidade.	54
Figura 22. Relação entre CWSI e o potencial de água na folha (MPa) para os tratamentos de L40, L70, L100 e L130 na cultura do milho.	55
Figura 23. Valores de produtividade de biomassa seca por parcela. Letras diferentes diferem entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.	57
Figura 24. Valores de produtividade de biomassa seca aérea estimada (Mg ha^{-1}) para os níveis de reposição hídrica 40, 70, 100 e 130%, para um período de cultivo de 60 dias. Letras diferentes diferem entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.	58
Figura 25. Valores de produtividade de biomassa fresca aérea estimada (Mg ha^{-1}) para os níveis de reposição hídrica 40, 70, 100 e 130%, para um período de cultivo de 60 dias. Letras diferentes diferem entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.	58
Figura 26. Valores de produtividade de água para matéria seca da parte aérea total (kg m^{-3}) para os níveis de reposição hídrica 40, 70, 100 e 130%. Letras diferentes diferem entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Histórico de produção e relação dos principais países produtores de milho no mundo dos anos de 2008 a 2014. (em milhões de toneladas).	16
Tabela 2. Fases de crescimento e desenvolvimento da cultura do milho.....	18
Tabela 3. Valores dos parâmetros empíricos (α , m e n), umidade residual e de saturação (θ_r , θ_s) do modelo de Van Genuchten, umidade do solo na capacidade de campo (θ_{cc}), no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) e capacidade de água disponível no solo (CAD), obtidos por meio de análise física do solo feita no laboratório de física do solo do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP em setembro de 2016.....	31
Tabela 4. Resultado da análise química de solo na área experimental.	33
Tabela 5. Quantidades aplicadas e épocas de adubação via fertirrigação, para nutrição das plantas. (DAS: dias após a semeadura).	33
Tabela 6. Esquema da análise de variância.	34
Tabela 7. Resumo da análise de variância com valores de F para o índice de área foliar (IAF) para os diferentes tratamentos de irrigação no milho.....	47
Tabela 8. Resumo da análise de variância com valores de F para o potencial de água na folha nos diferentes tratamentos de irrigação no milho.	48
Tabela 9. Resumo da análise de variância para temperatura das folhas nos diferentes tratamentos de irrigação no milho.....	50
Tabela 10. Resumo da análise de variância para CWSI nos diferentes tratamentos de irrigação no milho.	53
Tabela 11. Resumo da análise de variância para matéria seca total de parte aérea para os diferentes tratamentos de irrigação no milho.	56
Tabela 12. Resumo da análise de variância para produtividade de biomassa seca nos diferentes tratamentos de irrigação no milho.	59

1. INTRODUÇÃO

A região do semiárido brasileiro caracteriza-se em geral por vários problemas relacionados às questões hídricas, o que repercute em dificuldades no sistema de produção agropecuária. Os conhecimentos acumulados no decorrer do tempo referente ao clima permitem concluir que o volume de chuvas e sua má distribuição são responsáveis pela oferta insuficiente de água na região, associada a uma alta taxa de evapotranspiração, que resultam no fenômeno da seca, a qual periodicamente assola a população da região e toda a cadeia agrícola nela inserida.

Dentro do sistema de produção de forragem pode-se observar dois fatores que mais influenciam e limitam a produção de forragem, sendo eles a fertilidade do solo e o clima. Culturas forrageiras tradicionais como o milho, a exemplo, sofrem sazonalidades de produção em detrimento das condicionantes climáticas. O milheto (*Pennisetum glaucum*), planta anual, cespitosa, de crescimento ereto, apresenta boas produtividades de água e nutrientes devido ao seu sistema radicular vigoroso e profundo, proporcionando a cultura um bom aproveitamento de nutrientes mesmo em condições de restrição hídrica moderada a severa.

No Brasil, os primeiros relatos do cultivo de milheto datam do final da década de 1920 no Rio Grande do Sul. Desde então a cultura do milheto se expandiu e se espalhou pelo país, principalmente nos cerrados. O milheto apresenta alta tolerância à seca e adaptação a solos de baixo nível de fertilidade, o que explica o seu sucesso nos cerrados brasileiros (EMBRAPA, 2016).

O uso do milheto na agricultura brasileira vem aumentando rapidamente, principalmente para a produção de palhada no sistema de plantio direto, cada vez mais empregado no cerrado (DA COSTA, 2005). Além disso, o milheto pode ser usado na produção de forragem, no pastejo ou silagem, e na produção de grãos usados na fabricação de rações animais, em virtude do seu baixo custo e boa qualidade (Netto, 1998 e Rodrigues et al., 2001).

Segundo PAYNE, (2000) o milheto é o principal cereal usado na alimentação humana e animal nos trópicos semiáridos da África e da Índia, sujeitos constantemente à seca, às altas temperaturas e à deficiência de nutrientes. Nessas regiões semiáridas, o grão é colhido para a alimentação humana, e a palha restante é usada como forragem para animais (Andrews & Kumar, 1992). A Disponibilidade de nutrientes é outro fator que afeta consideravelmente a produção agrícola. O nitrogênio é um dos elementos mais importante em todo o ciclo de produção existem poucos estudos sobre avaliação da capacidade de produção de forragem desta cultura, devido à crescente procura de produtos de origem animal, necessidade de melhorar a produção de plantas forrageiras ganham mais espaço (NAGAZ., et al 2009). Uma característica da cultura do

milheto é a sua tolerância a solos arenosos, ácidos e de baixa fertilidade, solos que são limitantes à produção para culturas como milho e sorgo.

Quanto ao déficit hídrico, este afeta vários processos fisiológicos das plantas, o estresse, geralmente aumenta a resistência difusiva ao vapor de água, por razão do fechamento dos estômatos, reduzindo a transpiração e, conseqüentemente, o suprimento de CO_2 para a fotossíntese. Muitos desses efeitos refletem mecanismos de adaptação das plantas ao ambiente (Nogueira, 1997).

O maior entendimento do comportamento da cultura do milheto frente ao déficit hídrico pode sinalizar alternativas para produção de biomassa e forragem com maior eficiência no uso da água. Apesar da cultura apresentar uma eficiência elevada no uso da água, os trabalhos que visem investigar a dinâmica da produtividade de água do milheto sob déficit hídrico ainda são escassos.

Diante da hipótese de que o milheto responde ao déficit hídrico com um incremento de sua produtividade de água, os objetivos do presente trabalho foram: a) verificar a produção de biomassa total em função de diferentes níveis de reposição hídrica; b) verificar a dinâmica da produtividade de água da cultura em função da diminuição da oferta de água; c) verificar a dinâmica do potencial de água nas folhas da cultura em função da reposição hídrica; d) verificar o padrão de resposta termal da cultura em função da imposição dos diferentes níveis de reposição hídrica e correlacionar com os valores de potencial de água na folha da cultura.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Caracterização da espécie

O milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), pertencente à família Poaceae, subfamília Panicoideae, gênero *Pennisetum* (Bruken, 1977), tem várias sinonímias botânicas, sendo que nos últimos 300 anos, tem recebido nomes como *Pennisetum glaucum*, e *Pennisetum typhoides* (Burn.) Stapf e Hubb (CATELAN, 2010). Em 1976 foi novamente renomeado para *Pennisetum americanum* (L.) Leeke. Porém, Andrews e Rajewskim (1995) concluíram que o nome científico mais adequado para o milheto é *Pennisetum glaucum* L. em função das suas características genéticas.

De acordo com Kishel e Miranda (2000), o milheto é uma planta anual, cespitosa e de porte alto, podendo alcançar até cinco metros de altura. De origem das savanas africanas, sendo capaz de produzir mesmo diante de condições climáticas desfavoráveis e em solos com baixa fertilidade, porém, responde muito bem a adubação ou a solos com boa fertilidade (CATELAN, 2010). A cultura é conhecida por ter grande tolerância à seca, devido ao seu vigoroso sistema radicular, que pode alcançar até 3,6m de profundidade, e também à sua boa eficiência no uso da água (BONAMIGO, 1999).

Os colmos são lisos abaixo da panícula e normalmente possuem entre 1 e 2 cm de diâmetro, sendo que algumas vezes, apresentando ramificações secundárias e terciárias a partir de gemas laterais dos nós. A planta perfilha frequentemente, produzindo uma abundante folhagem (SANTOS, 2016).

As folhas podem ser lisas ou pilosas no limbo e apresentar lígulas pilosas. A lâmina foliar é lanceolada, podendo atingir 100 cm ou mais, com largura variando de 4 a 10 cm. A nervura central pode ser proeminente ou não, para cima ou tombada. Apresenta estômatos em ambos os lados da folha, em números iguais, podendo variar de 50 a 80 estômatos por milímetro quadrado. Pode apresentar folhas com cores variando do verde-amarelado a cor púrpura (HERINGER, 1995; SALTON & KICHEL, 1997; SANTOS, 2016).

A inflorescência é uma panícula terminal, rígida e compacta, cilíndrica, cônica ou de forma espiralada, de 5 a 50 cm de comprimento por 2 a 10 cm de diâmetro, embora algumas variedades incomuns possam crescer até 150 cm e as espiguetas (em número de duas por fascículo) são obovadas, curto-pediceladas e de 3,5 a 4,5 mm de comprimento. O florescimento é iniciado aos 50 dias de idade, e o ciclo da planta situa-se entre 70 e 90 dias (do plantio à maturidade fisiológica) (SANTOS, 2016).

2.2. Importância econômica

O milho é um dos cereais mais cultivados no mundo. Em detrimento de sua tolerância aos efeitos da seca, assim como a adaptação a solos arenosos pobres em nutrientes e matéria orgânica, o milho é muito cultivado no continente africano. Em países da África Saheliana e Sudanesa, a cultura é utilizada para alimentação humana, cujos grãos são um componente alimentar importante. Em países como o Brasil, Estados Unidos e Índia, o cereal é utilizado, principalmente, como cultura forrageira (EMBRAPA, 2016).

As informações sobre mercado de milho em escala global são disponibilizadas somente pela FAO, entretanto com defasagens de 2 e 3 anos. Desta maneira, os dados disponíveis com relação à produção de milho chegam até 2013/14. A Tabela 1, apresenta uma série histórica da produção de milho assim como os principais países produtores, onde pode-se identificar que a Índia, junto com Burkina Faso, China, Mali, Níger, Nigéria e Sudão, representam aproximadamente 80% da produção mundial. Vale ressaltar ainda que a Índia se destaca como o maior produtor mundial, ficando em média com um terço da quota de produção do mercado internacional de milho. Em 2013/14 a Ásia e a África foram responsáveis por, 51,3% e 44,6% respectivamente da produção mundial de milho (FAO, 2016).

Tabela 1. Histórico de produção e relação dos principais países produtores de milho no mundo dos anos de 2008 a 2014. (em milhões de toneladas).

Local	(Milhões de toneladas)					
	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14
Burkina Faso	0,97	1,15	0,83	1,08	1,11	0,97
China	1,23	1,57	1,57	1,6	1,62	1,78
Índia	8,78	13,29	12,66	10,75	10,91	11,42
Mali	1,39	1,37	1,46	1,77	1,15	1,71
Níger	2,68	3,84	2,93	3,86	3,00	3,32
Nigéria	4,93	5,17	1,27	5,00	5,00	1,38
Sudão	0,63	0,47	0,63	0,38	1,09	1,25
Mundo	26,07	32,61	27,2	30,2	29,87	27,83

FONTE: FAO (2016)

No Brasil, os primeiros relatos do cultivo de milho datam do final da década de 1920 no Rio Grande do Sul. A partir de então, o milho tem se espalhado no país. Tem havido um aumento da área plantada, principalmente na região de Cerrado, em virtude do seu potencial de cobertura do solo para a prática do plantio direto (PEREIRA FILHO et al. 2003). Seu sistema radicular vigoroso e sua alta capacidade de absorção de nutrientes são características que fazem do milho uma espécie adequada à cobertura verde (MARCANTE et al. 2011). A cultura também apresenta potencial forrageiro na pecuária de corte ou de leite, entretanto para a

exploração da cultura na atividade pecuária, deve haver aplicação de técnicas agrícolas que aumentem sua produção e produtividade (BUSO et al., 2011; EMBRAPA, 2016).

Já nas regiões Sul e Nordeste do Brasil o milheto tem sido utilizado no para alimentação animal, sendo que a aplicação do milheto no Sul do país é basicamente de pastoreio (PEREIRA FILHO et al. 2003). Seus grãos são empregados para produção de ração animal, sobretudo pelo seu valor proteico superior ao do sorgo e do milho. Nas regiões de cerrado, tem sido empregado para a cobertura morta e ciclagem de nutrientes. (BOER et al., 2007; TORRES E PEREIRA, 2008).

As informações da produção de milheto no Brasil são escassas, o país não é citado no banco de dados da FAO. Em trabalhos realizados pela Embrapa Milho e Sorgo (2008) sobre a cultura do milheto, a área plantada de com a cultura no Brasil foi de 4 milhões de hectares de na safra 2003/04 e estima-se 5 milhões de hectares na safra 2008/09. Com essa produção no Brasil o país aponta como a terceira maior área plantada do mundo, ficando atrás apenas de Índia e Níger.

2.3. Fenologia da cultura

Fenologia é o estudo dos fenômenos periódicos da vida animal e vegetal em relação às condições ambientais atuantes. O conhecimento da fenologia envolve todos os fenômenos relacionados ao crescimento e desenvolvimento da vida vegetal, tais como germinação, emergência, desenvolvimento do aparato fotossintético, florescimento, desenvolvimento de frutos e sementes. A reunião desses conhecimentos, de forma ordenada, possibilita a analogia das relações e grau de influência dos fatores envolvidos no processo produtivo. Favorecendo o estabelecimento de estratégias de manejo e tomada de decisão (FANCELLI; DOURADO NETTO, 1997).

O milheto tem três períodos distintos de crescimento, totalizando 9 estádios de desenvolvimento, os quais são descritos na Tabela 2. (KHAIRWAL et al. 1990; MAITI & BIDINGER, 1981).

Tabela 2. Fases de crescimento e desenvolvimento da cultura do milho

FC- Fases de Crescimento (3): ED- Estádios de Desenvolvimento (9)	Identificação da Característica	Dias Após Emergência*
FC 1 – Fase de Crescimento 1:	Fase Vegetativa:	0-21
a- ED0	Emergência	2-3
b - ED1	Três folhas	3-7
c- ED2	Cinco folhas	7-14
d- ED3	Iniciação da Panícula	14-21
FC 2 – Fase de Crescimento 2:	Fase de Desenvolvimento da Panícula:	21-42
e- ED4	Folha Bandeira	21-28
f - ED5	Estádio de Emborrachamento	28-35
g - ED6	Estádio 50% Florescimento	35-42
FC 3 – Fase de Crescimento 3:	Fase de Enchimento de Grão:	42-77
h - ED7	Estádio Leitoso	42-49
i- ED8	Estádio Pastoso/Farináceo	49-56
j- ED9	Maturidade Fisiológica ou Formação da camada preta	56-63

*Pode variar devido às condições ambientais, locais e variedades.

Fonte: Khairwal et al. (1990) e Maiti & Bidinger (1981).

De acordo com (MAITI & BIDINGER, 1981) as fases fenológicas na cultura do milho são:

- 1) Fase de Crescimento 1 (FC1): Fase Vegetativa** – inicia com a emergência do coleoptilo da superfície do solo (ED0) e inclui ED1, ED2 e ED3
 - a) Estádio de Desenvolvimento 0 (ED0): Emergência – é identificada pela emergência do coleoptilo à superfície do solo. É influenciado pela profundidade de plantio, textura do solo, umidade e temperatura. Essa fase apresenta duração de 2 a 3 dias sob condições ótimas. Um número de mudanças ocorre na semente antes da emergência do coleoptilo na superfície do solo: absorção de água pela semente, que ativa o metabolismo nas células e inicia a germinação; emergência da radícula da região próxima do hilo, aproximadamente com 16 horas da iniciação da germinação seguidas pelo desenvolvimento da plúmula juntamente com a bainha do coleoptilo aproximadamente 2 horas mais tarde; radícula cresce rapidamente e produz finas raízes capilares. Coleoptilo cresce vagarosamente através do solo até emergir da superfície do solo.
 - b) Estádio de Desenvolvimento 1 (ED1): Estádio de três folhas. É possível observar a terceira folha no cartucho da segunda folha sem separação da primeira e da segunda folhas, aproximadamente 5 dias após emergência do coleoptilo; há a expansão da terceira folha e a segunda é ainda levemente enrolada na base. Há crescimento rápido das raízes seminais e é possível observar o surgimento das primeiras raízes adventícias. As folhas são pequenas em comprimento e apresentam coloração verde bem viva sob a luz direta do Sol.

- c) Estádio de Desenvolvimento 2 (ED2): Estádio de cinco folhas. É possível visualizar a quinta folha nas plantas dos 13 aos 15 DAS (dias após o plantio). Expansão completa da primeira e segunda folha, bem como a terceira folha se apresenta levemente enrolada. A gema apical ainda se apresenta abaixo do solo. Observa-se primórdios dos perfilhos na bainha das folhas basais, bem como, as plantas começam a apresentar maior vigor e coloração verde mais escura;
- d) Estádio de Desenvolvimento 3 (ED3): Iniciação de Panícula é definida como a mudança entre o estágio vegetativo para o estágio reprodutivo. Apresenta o primórdio da espiguetas em contraste ao surgimento de novas folhas, bem como completa expansão de folhas ou em vários estágios de desenvolvimento. Os primeiros 2 ou 3 entrenós se alongam, assim como a gema apical apresenta-se acima da superfície do solo. Também observa-se maior concentração de raízes adventícias. Há aumento no número de perfilhos, com padrão similar ao perfilho primário, entretanto menos avançados nos estádios fenológicos do que este.
- 2) **Fase de crescimento 2 (FC2): Floração plena e frutificação.** A panícula passa por uma série de distintas mudanças morfológicas e de desenvolvimento durante o processo de alongação dos colmos. Compreende os estádios ED4, ED5 e ED6.
- e) Estádio de Desenvolvimento 4 (ED4): É marcado pelo surgimento da folha bandeira em que ela é visível e não há mais folhas com lâminas enroladas. Na iniciação da panícula, há a máxima expansão das folhas, bem como, a alongação dos internódios é acelerada, em que em que da base ao ápice, o tamanho dos internódios é crescente; desenvolvimento de ramificações, espiguetas e primórdios florais, bem como, o rápido desenvolvimento em floretes. Neste estágio, a panícula permanece enrolada na bainha da folha bandeira.
- f) Estádio de Desenvolvimento 5 (ED5): Marcado pela fase de emborrachamento em que, embora ainda que a panícula esteja enrolada na bainha da folha bandeira, há um grande crescimento em diâmetro e comprimento. A panícula também inicia a emergência do colar da folha bandeira com a alongação do pedúnculo neste estágio.
- g) Estádio de Desenvolvimento 6 (ED6): marcado por apresentar de 50% de florescimento. Em milheto, a antese feminina acontece antes da antese masculina (protoginia). A emergência completa dos estigmas necessita de 48 a 72 horas (2 a 3 dias). A metade do florescimento ocorre durante o tempo em que a emergência dos estigmas florais alcança o. A primeira abertura ocorre em flores perfeitas e a segunda em flores masculinas. A emergência da antera da panícula continua por 5 a 6 dias. Os

perfilhos em plantas devem florescer ao mesmo tempo ou mais tarde. A protoginia em milho favorece a polinização cruzada, o vento é o principal agente polinizador, mas insetos também participam da polinização.

- 3) Fase de Crescimento 3 (FC3):Enchimento dos grãos.**Inicia-se pela fertilização e contempla as fases de desenvolvimento e maturação fisiológica dos grãos. Contempla as fases de desenvolvimento ED7, ED8 e ED9.
- h) Estádio de Desenvolvimento 7 (ED7): Marcada pela formação de grãos leitosos, que tornam-se visíveis no florete em 6 a 7 dias após fertilização. A semente é preenchida primeiramente com fluido aquoso e, mais tarde, com fluido leitoso. Há uma rápida deposição de amido no endosperma. Há também aumento no peso da matéria seca do grão.
 - i) Estádio de Desenvolvimento 8 (ED8): Caracteriza-se pela mudança de grão leitoso para grão pastoso. Há também um aumento no conteúdo de amido e decréscimo em umidade. A fase de enchimento de grão vai chegando ao fim, e caracteriza a mudança do estágio de grão pastoso para grão farináceo, tendo, então, aumento da matéria seca de grãos.
 - j) Estádio de Desenvolvimento 9 (ED9): Caracteriza-se pela formação da camada preta no hilo da semente, o que marca a maturidade fisiológica dos grãos. Ela começa no grão da parte superior da panícula. A cariopse atinge máximo peso seco, ao tempo em que a importação de carboidratos cessa e a região preta forma-se na região do hilo.

2.4. Potencial de água na folha

O potencial hídrico foliar (Ψ) tem sido usado, principalmente, para o entendimento dos mecanismos envolvidos e os processos afetados no controle do déficit hídrico pela planta (Martins et.al 2011). O déficit hídrico é o estresse ambiental que mais interfere no desenvolvimento das culturas agrícolas. Sendo a disponibilidade de água as plantas o fator que mais influência no rendimento de grãos da cultura do milho, por ocasionar perturbações fisiológicas e morfológicas que prejudicam o desenvolvimento e o rendimento desta cultura.

Quando o conteúdo de água no solo decresce, o potencial da água no solo e na folha também decresce e, como consequência, o déficit hídrico se desenvolve nas folhas e as células guardas perdem turgor, causando fechamento estomático (BIANCHI, 2004). De acordo

Guimarães et al. (2006), pequenas diferenças no potencial de água na folha podem ser verificadas quando as plantas já passaram por déficits hídricos e acionaram mecanismos de tolerância.

Para medir o potencial de água na planta, o método comumente utilizado é a câmara de pressão de Scholander. Este método é baseado na possibilidade de poder-se mensurar a pressão hidrostática da seiva xilemática em uma câmara de pressão e a partir daí, correlaciona-la com o potencial hídrico foliar (SCHOLANDER, et. al, 1964).

Nos anos 1970, considerava-se o potencial da água foliar o melhor indicador do estado hídrico da planta (HSIAO, 1973). Boyer (1970) observou que, com o decréscimo do potencial da água na folha, havia inibição na expansão foliar antecipada e mais intensa que na fotossíntese e a respiração da planta do milho, da soja e do girassol. Potenciais da água na planta menores do que $-0,4$ MPa afetavam a expansão foliar de maneira significativa, embora a máxima taxa fotossintética ocorresse com potenciais foliares entre $-0,6$ a $-0,8$ MPa.

2.5. Crop Water Stress Index (CWSI)

O manejo de água na irrigação é diretamente influenciado pelos fatores relacionados à cultura, clima e solo, os quais determinarão a quantidade de água e o momento de cada lâmina de irrigação. Várias metodologias têm sido pesquisadas a fim de determinar a quantidade de água a ser utilizada e a época de sua aplicação, a fim de racionalizar o uso da água, tendo em vista o aumento da demanda desse recurso em vários setores da economia. Assim sendo, diversos métodos que analisam características de plantas têm sido empregados, dentre eles, a determinação da temperatura da cobertura vegetal, a qual tem sido utilizada para estimar índices de estresse hídrico da cultura (FERNANDES, 2010).

Dentre diversas formas de verificar o estado hídrico das plantas, a temperatura foliar é um método que baseia-se na hipótese que a transpiração resfria a superfície foliar (calor latente de vaporização) em detrimento do ar adjacente (TRENTIN, 2010). Neste sentido, à medida que a água vai se tornando cada vez mais limitante, a transpiração vai reduzindo, isto acarreta no aumento da temperatura da folha em função da absorção de radiação (JACKSON, 1982).

O uso de índices de estresse hídrico somente tornou-se possível com a popularização da tecnologia da termometria por infravermelho (FERNANDES, 2010). Neste sentido, Stockle & Dugas (1992) relataram que o uso de medidas de temperatura da cobertura vegetal, tornou-se prático com o desenvolvimento dos termômetros infravermelhos capazes de medirem a radiação térmica emitida.

Os termômetros infravermelhos medem a emissão de radiação térmica dos objetos. O fluxo líquido de energia está de acordo com a lei de *Stefan-Boltzman*. A radiação infravermelha tem propriedades óticas da radiação visível, tais como a reflexão e refração. A medida de temperatura da superfície de um alvo, com termômetro infravermelho, consiste na medida da diferença entre a temperatura do sensor do termômetro e a temperatura do alvo, chamada de temperatura relativa, e na medida da temperatura do sensor (FERNANDES, 2010). Nesse sentido, ao mensurar o fluxo de radiação emitida por um corpo qualquer, pode-se estimar sua temperatura (MAGIOTTO, 1996).

Das vantagens do sensor estão a relativa facilidade do uso, custo baixo, se trata de um método de análise não-destrutiva das plantas e a relativa rapidez na coleta dos dados (COSTA, 2016), pois não há necessidade de contato físico do sensor com as folhas do dossel das plantas. Entretanto, há algumas limitações no seu uso. Macguire et al. (1989), após revisarem vários trabalhos sobre a aplicação da termometria por infravermelho, relataram que o ângulo de visada, a estrutura da vegetação e a porcentagem de solo coberto podem afetar as medidas do sensor térmico.

Ao combinar a equação de balanço de energia com a equação de Penman-Montheith, Jackson et al. (1981), apresentaram as considerações teóricas para o desenvolvimento do *Crop Water Stress Index (CWSI)*, baseando-se na diferença entre a temperatura foliar e a temperatura do ar, fazendo comparação entre a planta em condições de estresse hídrico severo (próximo ao ponto de murcha permanente) e a planta sem restrições hídricas, denominados linha-base superior e inferior, respectivamente.

Desta maneira, o limite superior experimental representa uma condição de estresse máximo da cultura, quando os estômatos estariam completamente fechados, e o limite inferior é a medida representativa da planta sem restrição hídrica alguma. A posição da linha de estresse máximo pode ser determinada experimentalmente quando a umidade do solo está próxima do ponto de murcha permanente. Assim sendo, de acordo com os limites experimentais, um índice de estresse hídrico para as culturas está compreendido entre zero (estresse hídrico nulo) e um(máximo estresse hídrico) (TRENTIN, 2010).

Sob condições de estresse hídrico, os estômatos da planta permanecem fechados e a transpiração diminui fazendo com que a temperatura da folha aumente (COSTA, 2016). Uma planta sem estresse hídrico apresenta uma temperatura foliar de 1°C a 4°C mais baixa que a temperatura da do ambiente, e neste caso, o CWSI é igual à zero. Quando a transpiração diminui, a temperatura da folha sobe e pode ficar entre 4°C e 6°C acima da temperatura ambiente, neste

caso, então, o estresse hídrico é elevado e a planta tem sua transpiração foliar fortemente reduzida e o CWSI fica mais próximo a um (TRENTIN, 2010).

Para utilizar o CWSI em uma cultura, deve-se conhecer as linhas base superior e inferior, sendo que estas podem ser definidas de diversas maneiras (COSTA, 2016). Jackson et al. (1981) sugeriram equações para estimar tais linhas, que baseiam-se nos dados meteorológicos locais. Ramirez et al. (2015), estudando CWSI em tomateiros cereja, utilizaram a maior e a menor diferença entre a temperatura do ar e a temperatura das plantas para definir as linhas base de temperatura superior e inferior, respectivamente, e assim, encontrando altos valores de correlação entre o CWSI calculado com linhas base estimadas pelo método de Jackson, (1981) e o CWSI calculado com as linhas base determinadas pela diferença de temperaturas especificadas anteriormente.

2.6. Índice de área foliar

O índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) é definido como sendo uma relação funcional existente entre a área foliar da planta pela área do solo ocupada pela projeção do dossel da cultura. Considerando-se que a produtividade agrícola é função da produção da biomassa útil colhida pela área ocupada, então, é válido mensurar a área foliar nessa mesma base de rendimento (FAVARIN et al., 2002; WATSON, 1952).

A importância da área foliar de uma cultura é um conhecido parâmetro que relaciona-se com a produtividade, pois o processo fotossintético está diretamente relacionado com a interceptação de radiação solar pelas plantas e sua conversão em energia química (FAVARIN, et al 2002). Leong (1980) citado por Favarin et al. (2002) afirma que a eficiência da fotossíntese é dependente da área foliar e da interceptação de radiação solar, que por sua vez são, influenciadas pelas características da arquitetura da copa e do sistema fotoassimilador.

Deste modo, a superfície foliar de uma planta é basilar para o rendimento potencial de uma determinada cultura. Além disso, o devido conhecimento da área foliar permite a estimativa da perda de água por transpiração, sendo as folhas o órgão responsável pelas trocas gasosas das plantas (PEREIRA et al., 1997).

Existem vários métodos para a estimativa de IAF, que são classificados como diretos e indiretos. Daughtry (1990) cita diferentes metodologias para a estimativa do IAF; dentre os métodos diretos, destacam-se os seguintes: a) método de delineamento da folha; b) método com base na combinação de formas e tamanhos- padrão; c) método de cálculo com base em medidas

lineares; d) método com base na relação entre área e massa foliar; e e) método da planimetria óptica. Já as metodologias para obtenção do IAF de maneira indireta são comumente baseadas na interceptação de radiação do dossel, a partir da teoria de transferência de radiação. Welles (1990) e Welles & Cohen (1996) descreveram uma série de instrumentos e métodos para realizar estas medições, entre os quais estão as fotografias hemisféricas, o sensor quântico de linha, DEMON, e o LAI-2000. Em geral, os métodos de medida direta apresentam maior precisão, mas são mais laboriosos que os indiretos (XAVIER et al., 2002).

Ao estudar o desempenho agrônômico de três variedades de milho, Pires et al. (2007), adotando a metodologia do fator de forma, verificou que o máximo IAF para as plantas se deu em média aos 52 dias após plantio (DAS), no estágio de floração plena (estádio fenológico ED6), para as variedades ADR500, ADR300 e BN2, e verificou também, diferença significativa entre as variedades na ordem de $7,43 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ para valores máximos e $3,79 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ para valores mínimos de IAF, demonstrando a variação fenotípica da cultura.

Braz et al. 2005, utilizando a metodologia do integrador de área foliar, encontrou valores de IAF para milho na ordem de $4,99 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$, para a variedade BN2, bem como, também verificou que para as condições experimentais, o milho superou o milho híbrido HT BRS 3150, da EMBRAPA, em valores de IAF.

2.7. Produção de biomassa e produtividade de água

O pensamento tradicional acerca do manejo de irrigação persegue a maximização da produção agrícola, independente do volume de água utilizado. Considerando que a maior parte das áreas irrigadas no Brasil a água não é um fator limitante e atualmente não entra no custo de produção, tendo tão somente os custos de bombeamento e condução da água. Sob esta perspectiva, se faz importante construir uma relação entre a produtividade das culturas e a quantidade de água requerida na produção. Introduz-se assim o conceito de produtividade da água e / ou eficiência do uso da água, que no caso da irrigação pode ser relacionado ao total de água utilizado por quilograma produzido de biomassa de interesse comercial (Paz et al., 2000; Martin et al., 2012).

Diversos pesquisadores têm proposto indicadores que visam mensurar a utilização de água na produção agrícola, assim como, avaliar o desempenho de sistemas de produção agrícola irrigada, dentre estes, a produtividade da água, citada por alguns autores (fisiologistas) como eficiência no uso da água (BOS et al., 1994; PERRY, 1996; BARBOSA, 2015).

Vale frisar que existe um pouco de confusão na definição do conceito de eficiência no uso da água, sendo que este é muitas vezes relacionado para avaliar o desempenho da planta, quando se aplica a razão entre assimilação de fotoassimilados e a taxa de transpiração, e, corriqueiramente é aplicado também como sinônimo de eficiência na aplicação de água ou eficiência dos sistemas de irrigação (PEREIRA et al., 2002). Neste contexto, o uso do termo produtividade de água tem sido mais empregado para definir a relação entre a produção agrícola e a quantidade de água requerida no ciclo da cultura (FRIZZONE et al., 2012).

A conservação e a economia de água desempenham papel fundamental para conviver com períodos de escassez (Pereira et al., 2002), sendo que, a irrigação deficitária pode constituir uma tecnologia apropriada para contribuir com a economia de água, pois a irrigação em excesso leva a um desperdício de água, a um aumento dos custos de produção e a uma gestão inapropriada dos recursos hídricos disponíveis, principalmente em regiões de irrigação suplementar. Vários estudos mostraram que uma maior eficiência do uso da água poderia ser alcançada através do uso de fertilizantes. Em sua revisão clássica sobre fertilizantes e uso eficiente da água, Viets (1962) concluiu que na maioria dos casos, quando o suprimento de água é fixo, qualquer fator de manejo que aumente o rendimento agrícola aumentará a eficiência do uso da água.

O milheto produz boa quantidade de biomassa, variando na ordem de 5 a 15 Mg ha⁻¹, variação que ocorre em virtude das condições climáticas, adubação e fertilidade do solo, bem como, épocas de semeadura (PIRES et al., 2007).

O milheto possui a característica de boa eficiência no uso da água. Segundo Tabosa et al. (1998), a planta utiliza 280 kg água/kg de matéria seca (MS) total aérea. Chapman e Carter (1976) observaram que o milheto utilizou 302 kg água/kg MS, em comparação com o milho, trigo e sorgo que utilizaram 370, 590 e 321 kg água/kg MS, respectivamente. De acordo com tais estudos, comparando com o milho e o trigo, o milheto produziu a mesma quantidade de MS com 25% e 51% menos água, respectivamente.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi realizado na área de pesquisa do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/ESALQ-USP em ambiente protegido (Figura 1), situada no município de Piracicaba – SP. O clima da região, pela classificação climática de Köppen, é do tipo *Cwa*, isto é, subtropical úmido, com três meses mais secos (junho, julho e agosto), caracterizado por chuvas no verão e seca no inverno.

Figura 1. Local de instalação do experimento no Departamento de Engenharia de Biosistemas ESALQ/USP (a); ambiente protegido onde o trabalho foi conduzido (b).

A casa de vegetação, com pé direito de 3,0 m, é constituída de cobertura de filme plástico de polietileno transparente de 150 micras de espessura e laterais fechadas com tela tipo sombrite, com 30% de interceptação da radiação global. As unidades experimentais foram distribuídas em uma área útil de estufa de aproximadamente 160 m², e constaram de 96 caixas de fibrocimento (cimento amianto) de volume aproximado de 100 dm³, com dimensões de 60 cm x 45 cm x 40 cm (altura, largura e profundidade, respectivamente), as caixas foram distribuídas em quatro linhas espaçadas em 0,8m umas das outras e com espaçamento de 0,5m entre as caixas nas linhas, mantendo-se uma distância de 1,0m das laterais da estufa e sendo suspensas do solo por dois blocos de concreto (Figura 3).

O preenchimento das 96 caixas ocorreu da seguinte maneira (Figuras 2 e 3): Figura 3a: alinhamento das caixas; Figura 3b: colocação de uma camada de aproximadamente 1,0cm de pedrisco; Figura 3c: colocação de manta geotêxtil por sobre o pedrisco; Figura 3d: preenchimento do solo até atingir 40 cm de profundidade. O solo utilizado para o preenchimento das caixas foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico série Sertãozinho, textura franco-arenosa.

Figura 2. Esquema de como foi depositado o solo em cada unidade experimental (caixa).

Figura 3. Etapas do enchimento das 96 caixas: (a) alinhamento das caixas; (b) colocação de uma camada de aproximadamente 1,0 cm de pedrisco; (c) colocação de uma manta geotêxtil (bidim) acima do pedrisco; (d) preenchimento com solo até a altura de 40 cm (SCANAVINI, 2014).

3.2 Condução do experimento

A semeadura foi efetuada no dia 27 de novembro de 2016 e a colheita foi efetuada entre os dias 26 e 27 de janeiro, totalizando um ciclo de 60 dias, cuja condução será descrita nos tópicos a seguir.

3.2.1 Manejo da irrigação

O sistema de irrigação que foi utilizado no experimento é composto por um reservatório de 500 litros, tubulação de polietileno, conjunto motobomba KSB® 500N, dois filtros de discos e

quatro cabeçais com 8 registros cada, para controle da vazão do sistema. Em cada parcela, há dois gotejadores do tipo botão (PCN-CNJ) de 8 L h^{-1} ; para uma melhor distribuição da área molhada, foram instalados divisores de descarga com duas hastes (Figura4).

Figura 4. Sistema de gotejamento com gotejadores autocompensantes e divisores de descarga.

O sistema de irrigação foi avaliado para se verificar a vazão dos gotejadores e o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), bem como a vazão total do sistema. O valor do CUC do sistema foi de 95,46%, o valor do CUD para o sistema foi de 86,09% a vazão média dos gotejadores foi de $7,81 \text{ L h}^{-1}$ e a vazão do sistema foi de $1,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. De acordo com a classificação citada em Mantovani, (2002), o desempenho do sistema foi considerado excelente.

Para a realização do manejo da irrigação foram instalados três tensiômetros em três profundidades (15 cm, 25 cm e 35 cm), ilustrados na Figura 5, em cada caixa relativa a lâminas de reposição 100% (cem por cento) da CAD do solo, totalizando 48 tensiômetros. As leituras dos tensiômetros foram realizadas com um tensímetro de punção digital (Figura 6), devidamente calibrado em um manômetro de coluna de mercúrio.

Figura 5. Tensiômetros instalados nas três profundidades, ilustrando as respectivas zonas.

Figura 6. Tensímetro digital utilizado nas leituras de potencial de água no solo (a) e tensiômetros instalados nas três profundidades (b).

As leituras dos tensiômetros foram convertidas em potencial mátrico do solo (Equação 1), feitas a cada três dias para aplicar-se um turno de rega fixo, descontando-se a pressão equivalente à altura de coluna d'água no tensiômetro para cada zona avaliada. As pressões (h_c) equivalentes em cada zona monitorada foram de 3,0 e de 6,0 kPa para os tensiômetros que representam as camadas de 0-20 cm e de 20-30 cm e 30-40 cm, respectivamente.

$$\Psi_{ma} = l_t - h_c \quad (1)$$

Em que:

Ψ_{ma} – potencial mátrico do solo, em kPa;

l_t – tensão de água no solo (leitura do tensiômetro), em kPa; e,

h_c – pressão equivalente à altura da coluna d'água no tensiômetro, em kPa;

A partir destas leituras e dos parâmetros obtidos na curva de retenção do solo calculou-se por intermédio do modelo de van Genuchten (1980), descrito na Equação 2, a lâmina de reposição (irrigação) para o tratamento L100. Os parâmetros característicos do solo estão descritos na Tabela 3.

$$\theta_{(\Psi_{ma})} = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha |\Psi_{ma}|)^n]^m} \quad (2)$$

Em que:

$\theta_{(\Psi_{ma})}$ – umidade volumétrica atual do solo em função do potencial mátrico, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_r – umidade volumétrica residual do solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_s – umidade volumétrica do solo saturado, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

m e n – parâmetros de regressão da equação, adimensionais;

α – parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, em kPa^{-1} ; e

Ψ_{ma} – potencialmátrico atual do solo , em kPa.

Tabela 3. Valores dos parâmetros empíricos (α , m e n), umidade residual e de saturação (θ_r , θ_s) do modelo de Van Genuchten, umidade do solo na capacidade de campo (θ_{cc}), no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) e capacidade de água disponível no solo (CAD), obtidos por meio de análise física do solo feita no laboratório de física do solo do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP em setembro de 2016.

Profundidade	α kPa ⁻¹	m	n	θ_r cm ³ cm ⁻³	θ_s cm ³ cm ⁻³	θ_{cc} cm ³ cm ⁻³	θ_{pmp} cm ³ cm ⁻³	CAD mm
0-20 cm	1,3461	0,1802	2,7275	0,095	0,422	0,225	0,102	18,32
20-30 cm	1,571	0,1649	2,5001	0,0845	0,4121	0,226	0,098	12,83
30-40 cm	1,128	0,2758	1,5638	0,123	0,375	0,242	0,133	11,97

Com os dados de umidade de cada camada e a caracterização físico-hídrica do solo em cada zona monitorada, foram calculadas as lâminas necessárias para elevar a umidade até a capacidade de campo (θ_{cc}) por meio da Equação 3. A soma das lâminas necessárias para a reposição em cada profundidade resultou na lâmina de irrigação a ser aplicada (Equação 5). E, por fim, o tempo necessário para a irrigação foi obtido através da Equação 6.

$$Lx = (\theta_{cc} - \theta(\Psi_{ma}))z \quad (3)$$

Em que:

Lx – lâmina necessária para se elevar a camada x até a capacidade de campo, em mm;

θ_{cc} – umidade volumétrica do solo na capacidade de campo para a zona x , em cm³ cm⁻³;

$\theta(\Psi_{ma})$ – umidade volumétrica atual para a zona x , em cm³ cm⁻³; e

z – espessura da zona x , em mm.

$$LI = L_{0-20} + L_{20-30} + L_{30-40} \quad (4)$$

Em que:

LI – lâmina necessária para se elevar a umidade do solo até capacidade de campo, em mm;

$L_{(0-20)}$ – lâmina necessária para se elevar a umidade da zona de 0-20cm até capacidade de campo, em mm;

$L_{(20-30)}$ – lâmina necessária para se elevar a umidade da zona de 20-30cm até capacidade de campo, em mm; e

$L_{(30-40)}$ – lâmina necessária para se elevar a umidade da zona de 30-40cm até capacidade de campo, em mm.

$$T_i = \left(\frac{LI \cdot A_c}{Q_c} \right) \cdot 60 \quad (5)$$

Em que:

T_i – tempo de irrigação, em minutos;

LI – lâmina necessária para se elevar a umidade do solo até a capacidade de campo, em mm;

A_c – área da unidade experimental, em m^2 ; e

Q_c – vazão conjunta dos emissores em cada unidade experimental, em $L\ h^{-1}$.

3.2.2 Tratos culturais e manejo fitossanitário

Os tratos culturais se iniciaram assim que houve a emergência das plantas, com arranquio manual de plantas invasoras, que se seguiu ao longo do ciclo, sempre que houve necessidade. Aos 15 e aos 30 dias após a emergência (DAE), foi feita aplicação do inseticida CERTERO, pertencente ao grupo benzoiluréia, com uma dose recomendada para a cultura do milho, por ser semelhante ao milho, $100\ g\ ha^{-1}$.

Foram realizados dois raleios, com o intuito de padronizar e homogeneizar o stand das plantas nas parcelas, aos 5 DAE e aos 15 DAE, definindo-se um total de seis plantas por parcela.

3.2.3 Manejo nutricional das plantas

Foram coletadas amostras de solo (Figura 7) para fins de fertilidade do solo nas zonas de 0 – 20 e de 20 – 40. Cada amostra composta foi feita a partir de 10 coletas aleatórias em 10 caixas diferentes, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.

Figura 7. Coleta de solo para realização de análise química.

Tabela 4. Resultado da análise química de solo na área experimental.

Amostra	pH	M.O.	P	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
Composta	-	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³							%	
0-20	4,9	28	105	133	1,6	32	7	<1	28	40,6	68,6	59	0
20-40	5,1	22	95	100	1,3	25	6	<1	28	32,3	60,3	54	0

SB: Soma de bases trocáveis; CTC: Capacidade de troca de cátions; V: Saturação da CTC por bases; m: Saturação por Alumínio.

A interpretação da análise de solo foi feita de acordo com o Boletim 100(1997), do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). Para a calagem, foi utilizado calcário calcítico, com PNRT de 88%. Para fins de cálculo. Foi aplicado aproximadamente 23g de calcário com 90 dias de antecedência nas parcelas (0.881 Mg ha⁻¹).

As adubações nitrogenadas e potássica também foram aplicadas de acordo com a recomendação do boletim 100, via fertirrigação, fracionada em três aplicações, conforme a Tabela 5. Não houve necessidade de aplicação de adubo fosfatado de acordo com o resultado da análise química de solo, e, ao longo do experimento, as plantas não apresentaram sintomas de deficiência mineral de fósforo.

Tabela 5. Quantidades aplicadas e épocas de adubação via fertirrigação, para nutrição das plantas. (DAS: dias após a semeadura).

Adubações		Quantidade de adubo (kg ha ⁻¹)	
Parcela	DAS	Uréia	Cloreto de Potássio
1	7	77,00	57,00
2	17	154,00	192,00
3	27	269,00	230,00

3.2.4 Aplicação de tratamentos

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, sendo quatro blocos com quatro tratamentos e quatro repetições por bloco, cuja unidade experimental foi uma caixa com seis plantas. O croqui com a distribuição espacial das parcelas é exibido na Figura 8. As lâminas foram baseadas na reposição da CAD do solo da parcela de referência (L 100): em que L130 é a reposição de 130%, L100 é a reposição de 100%, L70 é a reposição de 70% da e L40 é a reposição de 40%. A lâmina foi definida a partir de leituras dos tensiômetros instalados no tratamento de L100. Para os demais, foi calculada a lâmina de reposição necessária a partir deste tratamento de referência.

Para a análise de variância dos resultados, foi utilizado o software R[®]. (Tabela 6). As variáveis que tiveram valores de F significativo a 5% de probabilidade na análise de variância foram submetidas à análise de regressão e ao teste de Tukey a 5% de probabilidade. A plotagem dos gráficos foi feita nos softwares R[®] e Excel[®].

Figura 8. Croqui do experimento com quatro blocos e quatro repetições por bloco.

Tabela 6. Esquema da análise de variância.

C.V.	G.L.
Blocos (B)	3
Lâminas (L)	3
Resíduo	57
Total	63

C.V.: Causa de variação; G.L.: Graus de liberdade.

3.3 Monitoramento microclimático

Os dados climáticos monitorados no interior da casa de vegetação, por meio de uma estação automática (Figura 9), durante o ciclo da cultura foram os seguintes: a densidade de fluxo (W.m^{-2}) da radiação solar global (Q_g), por meio de um piranômetro de fotodiodo de silício (LI200X - Campbell Sci.); a densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA, $\lambda = 400\text{--}700\text{ nm}$), por meio de um sensor quântico (LI190SB - Campbell Sci.) e a radiação líquida (R_n), através de saldo radiômetro (NRLITE - Campbell Sci.); a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar (%), com o uso de sensor Vaissala (HMP45C - Campbell Sci.); bem como a pressão atmosférica (em kPa) com o barômetro (Vaissala CS 106 - Campbell Sci.). Os sensores foram instalados no centro do vão no qual o experimento foi implantado dentro casa de vegetação e acima do dossel da cultura, ligados a um datalogger modelo CR1000 - Campbell Sci, programado para leituras a cada 30 segundos e gravação dos dados em intervalos de 15 minutos (valores médios).

Figura 9. Componentes da estação meteorológica instalada dentro da casa de vegetação.

3.4 Análise das plantas

Ao longo do ciclo, foram feitas três análises do potencial de água na folha (20/12/2016, 04/01/2017 e 21/01/2017); também foram feitas medições da temperatura de folha com canhão portátil e com câmera termal. Os dados de temperatura da folha, junto com os dados meteorológicos, serviram de base para a estimativa do CWSI da cultura.

Ao final do experimento, as plantas foram colhidas, sendo separadas àquelas destinadas as medições de AF (as quais foram pesadas e secas à parte; entretanto, para as medidas de produção e produtividade de biomassa, foram consideradas na soma total). As demais foram acondicionadas em sacos de papel devidamente identificados, foram analisadas quanto as

variáveis de matéria seca e verde; e esses dados serviram de base, junto com os dados de irrigação da cultura, para a estimativa de produtividade de água da cultura (PA).

3.4.1 Área foliar

No final do cultivo, as plantas foram colhidas, sendo escolhida uma planta representativa de cada parcela. Tais plantas foram marcadas e encaminhadas ao laboratório onde foram separadas as folhas dos caules para a determinação da área foliar (Figura 10a). Foi, então, medida a área foliar total (metro quadrado de folha por planta). Para as medições de área foliar total, foi utilizado o integrador de área foliar de bancada LI-3100C (LICOR[®]) (Figura 10b), com uma resolução de 1 mm².

Figura 10. Folhas separadas dos caules das plantas para medição da AF (a). Integrador de área foliar de bancada LI-3100C (LICOR[®]) (b).

Com a matéria seca das folhas da planta amostrada e a matéria seca da parcela total, foi feita a relação entre a matéria seca das parcelas e a matéria seca das folhas da parcela, por intermédio da Equação 6:

$$MS_{fpa} = \left(\frac{MS_{fpl}}{MS_{pl}} \right) \cdot MS_{par} \quad (6)$$

Em que:

MS_{fpa} – matéria seca de folhas total da parcela; em gramas;

MS_{fpl} – matéria seca de folhas da planta amostrada; em gramas;

MS_{pl} – matéria seca total da planta amostrada, em gramas; e,

MS_{par} – matéria seca total da parcela, em gramas.

Com os dados de AF individual de cada planta analisada, seu peso amostrado, bem como, a matéria seca de folhas da parcela, foi calculada a área foliar de cada parcela, por intermédio da Equação 7:

$$AFt = \left(\frac{AFf}{MS_{fpl}} \right) \cdot MS_{fpa} \quad (7)$$

Em que:

AFt – área foliar específica da Parcela (m^2);

AFf – área foliar da planta amostrada (m^2);

MS_{fpl} – matéria seca de folhas da planta amostrada; em gramas; e,

MS_{fpa} – matéria seca de folhas total da parcela; em gramas.

O IAF de cada parcela foi calculado com base na Equação 8. Para fins de estimativa da área foliar, foi considerado um efeito buquê, sendo a área considerada ilustrada na Figura 11.

$$IAF = \frac{(AFt)}{(Lp \cdot Cp)} \quad (8)$$

Em que:

IAF – índice de área foliar (m^2m^{-2})

AFt – área foliar total da parcela (m^2)

Lp – largura considerada da parcela, (0,9m); e

Cp – comprimento considerado de cada parcela, (0,6m).

Figura 11. Área utilizada para o cálculo do índice de área foliar, considerando a projeção da copa das plantas (efeito buquê) nas parcelas.

3.4.2 Temperatura foliar (canhão infravermelho)

Para avaliação da temperatura foliar foi utilizado um canhão infravermelho (Figura12). O sensor foi previamente calibrado antes das leituras. Essas avaliações foram realizadas acima do dossel, em folhas completamente expostas ao sol e com ângulo de inserção em relação ao plano vertical semelhante, em três repetições por parcela, sendo realizadas em dias de céu claro e em torno de meio-dia (horário onde a radiação incidente apresenta pouca variação). Com os dados coletados foram feitas as médias de temperatura por parcela em cada avaliação. As avaliações foram realizadas por tratamento.

Figura 12. Canhão infravermelho utilizado nas avaliações da temperatura foliar (a). Leitura d temperatura foliar (b).

3.4.3 Índice de estresse hídrico da cultura (*cropwater stress index – CWSI*)

Com os dados de temperatura das folhas obtidas por meio das leituras de canhão infravermelho, bem como, temperatura do ar, e déficit de pressão de vapor do ar, obtidas por intermédio das leituras da estação instalada na área experimental, calculou-se o índice de estresse hídrico da cultura (CWSI). O CWSI foi calculado conforme a metodologia proposta por Jackson, Kustas e Choudry (1988), de acordo com a Equação 9:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LBI}}{(T_c - T_a)_{LBS} - (T_c - T_a)_{LBI}} \quad (9)$$

Em que:

T_c – temperatura do dossel, °C;

T_a – temperatura média do ar, °C;

$(T_c - T_a)_{LBI}$ – linha base de temperatura inferior, que corresponde a diferença de temperatura do ar para uma cultura sem déficit hídrico, quando a resistência para a perda de água é nula ou correspondente a temperatura da superfície molhada, °C;

$(T_c - T_a)_{LBS}$ – linha base de temperatura superior, correspondente a diferença de temperatura do ar quando a resistência para a perda de água do dossel aumentar sem limites ou correspondente a temperatura da superfície seca, °C.

Para a estimativa das linhas base superior e inferior foi adotada a metodologia de Irmak et al (2000) para a cultura do milho, em que $(T_c - T_a)_{LBS}$ está situada em valores entre 4°C e 5,1°C superior à temperatura média do ar no momento da leitura de temperatura da folha. Para este trabalho, foi adotado o valor de 5°C. O cálculo do $(T_c - T_a)_{LBI}$, foi feito por meio da Equação 10.

$$(T_c - T_a)_{LBI} = 1,39 - (0,86 \cdot DPV) \quad (10)$$

Em que:

$(T_c - T_a)_{LBI}$ – Linha base inferior;

DPV – Déficit de pressão de vapor (kPa).

O déficit de pressão de vapor (DPV) foi determinado por meio das medidas de temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%), com o uso de sensor Vaissala (HMP45C - Campbell Sci.), e calculado por intermédio das Equações 11, 12 e 13:

$$e_s = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{7,5 \cdot T}{237,5 + T}\right)} \quad (11)$$

Em que:

e_s – pressão de saturação de vapor d' água no ar (kPa);

T – temperatura do ar, em °C;

$$e_a = \frac{UR(\%)}{100} \cdot e_s \quad (12)$$

Em que:

e_s – pressão de saturação de vapor d' água no ar (kPa);

e_a – pressão parcial de vapor d' água (kPa);

UR(%) – umidade relativa do ar.

$$DPV = e_s - e_a \quad (13)$$

Em que:

e_s – pressão de saturação de vapor d' água no ar (kPa);

e_a – pressão parcial de vapor d' água (kPa);

3.4.4 Potencial de água na folha

Para obtenção do potencial de água na folha foram efetuadas medidas utilizando uma câmara de pressão (Figuras 13a e 13b) (Modelo 3005, Soil Moisture Equipment Corporation, Santa Bárbara, CA, EUA) (SHOLANDER et al., 1964). Para isso, foram coletadas folhas das plantas sempre antes do amanhecer. As amostras foram acondicionadas e transportadas em caixa de isopor com bolsa de gelo isolada, de acordo com a Figura 13c (MELO et al., 2007). Com os dados coletados foram feitas as médias de potencial de água na folha de cada planta em cada dia de avaliação. Foram feitas três avaliações de potencial de água na folha durante a aplicação dos tratamentos.

Os dados coletados foram submetidos à análise de regressão, tendo como variável dependente o índice de estresse hídrico da cultura (CWSI).

Figura 13. Câmara de pressão de Scholander utilizada nas medições de potencial de água na folha (a). Análise do potencial hídrico foliar no milho (b). Caixa de isopor com resfriamento, usada no transporte do material (c).

3.4.5 Produção de biomassa da cultura

Ao final do experimento, foram coletadas todas as plantas da parcela, o material de cada parcela foi pesado para obtenção de matéria fresca total por parcela, e logo após, as amostras foram submetidas ao processo de secagem em estufa a 65°C durante 72 horas, e posteriormente pesadas para a obtenção dos valores de matéria seca.

Os valores de matéria seca e de matéria verde foram convertidos para megagramas (1Mg=1000kg) por hectare (Mg ha⁻¹) por intermédio da Equação 15:

$$PB = \frac{\left(\frac{P_{bp}}{A}\right)}{100} \quad (14)$$

Em que:

PB – Produção de biomassa (Mg ha⁻¹)

P_{bp} – Produção média de biomassa das parcelas (g);

A – Área em m² da unidade experimental (0,261).

3.4.6 Produtividade da água para produção de biomassa da cultura

A produtividade de água para a produção de biomassa foi estimada através da razão entre a produção de biomassa e o volume total de água aplicado e está descrita na Equação 15:

$$PAB = \frac{PB}{VT} \quad (15)$$

Em que:

PAB – Produtividade de água para biomassa (kg m⁻³);

PB – Produção de biomassa (kg);

VT – Volume de água total aplicado (m³).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tópico resultados e discussão está dividido nos seguintes subtópicos: informações micrometeorológicas, manejo da irrigação, índice de área foliar, potencial de água na folha, padrões de resposta termal da cultura, produção de biomassa e produtividade de água para biomassa.

4.1 Informações micrometeorológicas

Os dados de temperatura longo do ciclo do experimento (dezembro de 2016 e janeiro de 2017) são apresentados na Figura 14a. As mínimas diárias oscilaram entre 23,43 °C e 17,43 °C, com uma média de 21,38 °C ao longo do ciclo. A temperatura média oscilou entre 31,23 °C e 22,81 °C e a média para o período fechou em 27,31 °C. A temperatura máxima variou entre 43,55 °C e 29,51 °C tendo como média das temperaturas máximas 38,35 °C.

A umidade relativa do ar (UR%) para o período de condução do experimento pode ser visualizada na Figura 14b. Observa-se que a média máxima foi de 77,31%, oscilando entre a máxima de 99,5% e mínima de 27,86%.

Figura 14. Variação de temperaturas máximas, mínimas e médias (a) e da umidade relativa (UR%) máxima mínima e média (b) nos meses de dezembro de 2016 e de janeiro de 2017, dentro da casa de vegetação onde foi conduzido o experimento (DAS: dias após a semeadura).

4.2 Manejo da irrigação

Na Figura 15 são apresentados os dados de tensão de água no solo, auferidos nos dias de aplicação das lâminas de irrigação, nas três profundidades avaliadas, durante o experimento.

A diferenciação do manejo da irrigação se deu aos 15 DAS, entretanto, os valores médios de potencial mátrico do solo até os 30 DAS (Figura 17), foram de -5,79 kPa, -4,86 kPa e -5,40 kPa, para as profundidades de 15, 25 e 35 cm, respectivamente, tendo potenciais mínimos de -4,74 kPa, -4,12 kPa e -4,37 kPa e máximos de -8,89 kPa, -7,27 kPa e -7,48 kPa.

A partir dos 30 DAS, houve um aumento no crescimento das plantas, o que ocasionou um aumento no potencial mátrico do solo, acarretando no aumento da demanda hídrica. Os valores médios de tensão de água no solo a partir do 30 DAS até a colheita, foram de -20,55 kPa, -17,50 kPa, e -18,98 kPa, para as profundidades de 15, 25 e 35 cm, respectivamente; com valores

máximos de -26,24 kPa, -21,97 kPa, e -25,67 kPa 15, 25 e 35 cm, e mínimos de -14,18 kPa, -8,59 kPa, -9,12 kPa, para as respectivas profundidades.

Figura 15. Valores de potencial mátrico (kPa) do solo em função dos dias após a semeadura (DAS) durante o ciclo do experimento.

A lâmina de irrigação foi aplicada a cada três dias em manejo de irrigação via turno de rega fixo, em cada tratamento imposto durante o ciclo da cultura (Figura 16). O volume total de água aplicado ao longo do experimento é mostrado na Figura 17. Nota-se, que as maiores demandas por água se deram a partir dos 30 dias após a semeadura (DAS). Até os 30 DAS, a média da lâmina de irrigação para os tratamentos L130, L100, L70 e L40 foram de 2,3 mm, 1,8 mm, 1,3 mm e 1,0 mm, respectivamente. Após esse período, houve um aumento drástico na demanda hídrica da cultura, que se manteve até o período da colheita, com lâminas médias de irrigação de 22,7 mm, 17,5 mm, 12,3 mm, e 7,0 mm, respectivamente.

Figura 16. Volume água aplicado acumulado, em litros, aplicados nos tratamentos 40, 70, 100 e 130% durante o ciclo da cultura em dias após a semeadura (DAS).

4.3 Índice de área foliar

Sendo o índice de área foliar (IAF) um indicador relacionado à cobertura vegetal no dossel, este é de suma importância para estimativas de produtividade, pois a cobertura do solo pelo dossel de plantas está diretamente relacionada com a interceptação de radiação pela cultura, o que influencia diretamente na fotossíntese das plantas.

O resumo do quadro de análise de variância para o IAF pode ser visto na Tabela 7. De acordo com a análise de variância, houve diferença significativa nos tratamentos ao nível de 5% de significância. Os valores de IAF podem ser visualizados na Figura 17. O teste de Tukey para os tratamentos mostrou diferença significativa para IAF ao nível de 5% de significância e é apresentado na Figura 17.

O tratamento L40, em que a média do IAF ficou em $5,91 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, foi estatisticamente semelhante aos tratamentos L70, e L100, que tiveram valores de IAF de $8,28 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, $8,32 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, respectivamente. Os tratamentos L70 e L100, por sua vez, também foram semelhantes estatisticamente, ao tratamento L130 que foi o tratamento com maior valor de IAF, $9,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$.

Tabela 7. Resumo da análise de variância com valores de F para o índice de área foliar (IAF) para os diferentes tratamentos de irrigação no milho.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
Tratamento	3	104,18	34,727	4,7*
Bloco	3	10,60	3,533	0,48 ^{ns}
Resíduo	57	420,68	7,380	
Total	63	535,46		
Coeficiente de variação			28,41%	

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrado; QM: Quadrado médio; CV: Coeficiente de variação; *: Significativo ao nível de 5% de significância; ns: Não Significativo

Figura 17. IAF (índice de área foliar) para os tratamentos de L40, L70, L100 e L130. Letras diferentes diferem entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Estudos revelam uma variabilidade com relação ao IAF para a cultura do milho. Tal variação se deve em muito a fatores como manejo, época de plantio, variedades avaliadas e metodologia de cálculo utilizada. Geraldo et al. (2000) testando quatro variedades de milho, verificou que duas variedades africanas obtiveram valores máximos de IAF na ordem de $1,95 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, aos 60 dias após o plantio, entretanto, as cultivares BN2 e IAPAR obtiveram valores máximos de IAF por volta de 1,40 e 1,45 aos 54 e 58 dias após o plantio, respectivamente, trabalhando no período da safrinha. Já as observações realizadas por Pearson (1984) revelam, em seus estudos com milho na Índia, valores maiores, estimados em 1,7 e 2,9, nas estações seca e úmida, respectivamente. Craufurd e Bidinger, (1988) obtiveram valores maiores de IAF, na ordem de 3,5. Silveira et al. (2005) obteve valores de IAF de $4,99 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, aos 71 dias após o plantio, ao estudar a variedade BN2 conduzida entre dezembro de 2001 a abril de 2002. Pires et al. (2007) ao pesquisar as variedades ADR500, ADR300 e BN2, em experimento ocorrido entre

os meses de setembro e dezembro de 2004, em Rio Verde, Goiás, obtiveram valores de IAF próximos aos encontrados neste trabalho, com valores máximos aos 52 dias após o plantio, na ordem de $7,43 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, $6,26 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $3,79 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, para as três variedades, respectivamente.

Os dados deste trabalho ficaram próximos daqueles relatados por Singh (1995), que, ao estudar milho, sorgo e milheto sob diferentes níveis de disponibilidade hídrica, encontrou valores de IAF para plantas não estressadas da variedade PBH-12 na ordem de $11,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, e para plantas em máximo estresse hídrico do seu trabalho, e o autor relatou valor de IAF na ordem de $6,25 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$.

4.4 Potencial de água na folha.

Na análise de variância para o potencial de água na folha (Tabela 8), observa-se efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade para os tratamentos de lâmina de irrigação. Não houve efeito significativo para bloco.

Tabela 8. Resumo da análise de variância com valores de F para o potencial de água na folha nos diferentes tratamentos de irrigação no milheto.

Causa de variação	GL	SQ	QM	F
Tratamento	3	35.096	1,16988	325.09*
Bloco	3	0.0117	0,00389	1.08 ^{ns}
Resíduo	57	0.2051	0,00360	
Total	63	37.264		
CV			10,7%	

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrado; QM: Quadrado médio; CV: Coeficiente de variação; *: Significativo ao nível de 5% de significância; ns: Não Significativo

A variação dos dados de potencial de água na folha no pré-amanhecer para as datas avaliadas pode ser analisada no gráfico de box-plot da Figura 18. Na avaliação de potencial de água da folha de 6 dias após a aplicação dos tratamentos já há um efeito significativo para o potencial de água na folha em que todas as parcelas diferem entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de significância evidenciando uma resposta da cultura ao déficit hídrico. Entretanto, não houve efeito significativo entre as datas avaliadas. Na primeira avaliação, para o tratamento L100, houve um valor médio de potencial de água na folha de -0,49 MPa, já para a segunda avaliação, esse valor foi menor, na ordem de -0,39 MPa, e se manteve próximo, na avaliação seguinte, com um valor de -0,44 MPa. O tratamento L130 (130%) diferiu estatisticamente do valor do tratamento L100 nas três datas avaliadas, com valores médios de -0,36 MPa na primeira avaliação, -0,23 MPa, na segunda avaliação e -0,30 MPa na terceira avaliação. Os menores valores de potencial de água na folha se deram no tratamento L40 tais valores não variaram entre si nas

datas no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Para a primeira data, o valor médio de potencial de água na folha ficou na ordem de -0,9 MPa, para a segunda data, o valor médio de potencial de água na folha foi de -0,93 MPa e, por fim, para a terceira data, o valor médio encontrado de potencial de água na folha ficou em -0,9 1MPa.

Tais valores ficaram acima daqueles relatados por Singh (1995), que, ao estudar as culturas do milho, sorgo e milheto sob quatro regimes de irrigação, na estação seca, no norte da Índia, obteve valores de potencial de água na folha de -1,37 MPa para o milheto sem restrições hídricas. Para as plantas com o máximo de stress hídrico imposto, baseado numa fração da razão entre uma lâmina de irrigação pré-determinada (70 mm) e a evaporação do tanque classe A medida na área experimental, tais autores relatam valores na ordem de -2,1 MPa para potencial de água na folha na cultivar de milheto indiana PBH-12.

Figura 18. Valores de potencial de água na folha para os tratamentos de 40, 70, 100 e 130%. Letras diferentes diferem entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

4.5 Padrões de resposta termal da cultura

4.5.1 Temperatura foliar

A análise de variância para a temperatura das folhas pode ser visualizada na Tabela 9. Percebe-se que houve efeito significativo para os tratamentos de irrigação no experimento ao nível de 5% de significância. Entretanto, não houve efeito significativo para bloco.

Tabela 9. Resumo da análise de variância para temperatura das folhas nos diferentes tratamentos de irrigação no milho.

	GL	SQ	QM	F
Tratamento	3	498.54	166.180	61.326*
Bloco	3	109.06	36.352	13.415 ^{ns}
Resíduo	57	154.46	2.710	
Total	63	762.05		
CV			4,86%	

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrado; QM: Quadrado médio; CV: Coeficiente de variação; *: Significativo ao nível de 5% de significância; ns: Não Significativo

A Figura 19 ilustra a diferença de temperatura dos tratamentos de irrigação por intermédio do uso de câmera térmica. Os dados de temperatura das folhas medidos por intermédio do canhão infravermelho podem ser vistos no gráfico de box-plot da Figura 20. Os maiores valores de temperatura das folhas foram observados no tratamento L40, em que foram obtidos valores máximos de 42,4 °C. a média da temperatura foliar avaliada para o tratamento L40 foi de 38,16 °C, e foram observados valores mínimos de 33,73 °C para as condições experimentais. O tratamento que obteve menores valores de temperatura da folha foi o L130. Para este tratamento, a média de temperatura da folha avaliada foi de 31,3 °C e os valores máximos e mínimos foram de 33,11 °C e 28,19 °C, respectivamente. O tratamento de reposição L100 não deferiu estatisticamente do L130, observando-se valores máximos médios e mínimos de 36,32 °C, 27,85 °C e 31,51 °C, respectivamente.

Observando-se estes resultados, pode-se observar que houve um incremento na temperatura foliar das plantas sob regime de menor reposição hídrica (L40), ante àquelas sem restrição hídrica (L100 e L130) de aproximadamente 6,8 °C, o que confirma que o status hídrico da planta influencia na temperatura do dossel.

Ramírez et al. (2015) estudaram diferenças entre a temperatura foliar e as temperaturas do ar em tomateiros cereja (*Lycopersicum solanum*), fazendo uso de um canhão infravermelho, e observaram também, que plantas submetidas ao estresse hídrico mostraram um aumento de temperatura das folhas, se comparadas com aquelas que não tiveram déficit hídrico. A mesma observação foi feita por Costa, (2016), que verificou diferenças significativas na avaliação da temperatura foliar do cafeeiro submetido a quatro níveis de reposição hídrica vinte e quatro dias após a imposição dos tratamentos. Costa, (2016), em cafeeiro irrigado, observou diferenças na temperatura foliar de plantas irrigadas e não irrigadas, aos vinte e quatro dias após a imposição dos tratamentos havia diferenças na temperatura foliar entre 1 °C a 3 °C das plantas sob estresse hídrico com relação àquelas sem restrições hídricas.

As diferenças de temperatura encontradas neste trabalho corroboram com aquelas citadas por Nunes (2012), que ao estudar a temperatura do dossel de plantas de *feijão-caupi* sob regime de irrigação e sem irrigação, notou diferenças na temperatura foliar da ordem de 7°C entre

as plantas irrigadas e não irrigadas, aos sete dias de imposição dos tratamentos, observando também, que as plantas sem estresse, obtiveram temperatura foliar 4 °C abaixo da temperatura média do ar.

Ramírez et al. (2015) avaliando folhas de tomateiro com câmera térmica, também diferenças na temperatura foliar entre plantas com e sem estresse hídrico, sendo as plantas com estresse hídrico apresentando uma temperatura foliar média 6,71 °C acima das plantas sem estresse hídrico.

Trentin (2010) observou, ao estudar a temperatura foliar da cana-de-açúcar com canhão infravermelho, que a diferença entre as temperaturas da cultura e do ar ficaram próximas de 3,8°C numa condição de estresse severo, entretanto, para uma condição de estresse moderado, o autor verificou um acréscimo de temperatura de 1,9 °C. Então, para as condições de seu trabalho, ele verificou uma diferença de 1,9 °C na temperatura foliar entre plantas com estresse hídrico moderado e plantas com estresse hídrico severo.

Figura 19. Imagens obtidas com câmera térmica (modelo FLIR T640) no dossel do milheto (a) Nível de reposição hídrica de 40% (L40), (b) Nível de reposição hídrica de 70% (L70) (c) Nível de reposição hídrica de 100% (L100) (d) Nível de reposição hídrica de 130% (L130). O alvo representa a temperatura medida no pixel, e está representando a temperatura foliar medida no ponto amostrado.

Figura 20. Valores temperatura foliar amostrados no dia 04 de janeiro de 2017 (37 DAS), para os níveis de reposição hídrica de 40, 70, 100 e 130%. Letras diferentes diferem entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

4.5.2 Crop Water Stress Index (CWSI)

O resumo da análise de variância pode ser visto na Tabela 10 de acordo com a análise de variância, houve efeito significativo para os tratamentos de irrigação, entretanto, não houve efeito significativo para bloco.

Tabela 10. Resumo da análise de variância para CWSI nos diferentes tratamentos de irrigação no milho.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Tratamento	3	20.170	0.67233	45.662*
Bloco	3	0.3977	0.13257	9.004 ^{ns}
Resíduo	57	0.8393	0.01472	
Total	63	32.540		

CV = 29,88%

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrado; QM: Quadrado médio; CV: Coeficiente de variação; *: Significativo ao nível de 5% de significância; ns: Não Significativo

Houve efeito significativo para o CWSI calculado no teste de Tukey ao nível de 5% de significância, os dados podem ser visualizados no gráfico de box-plot da Figura 21. Valores próximos de um são indicativos de plantas que apresentam déficit hídrico, e valores próximos de zero, expressam plantas sem restrição hídrica. No gráfico, pode-se verificar que os maiores valores de CWSI foram encontrados no tratamento L40, com valor médio próximo de 0,75. Este

valor é seguido pelo valor encontrado no tratamento L70, com valor aproximado de 0,50 e, por fim, os tratamentos L100 e L130 não diferiram estatisticamente entre si, chegando a um valor médio aproximado de 0,25.

Esses dados demonstram que as linhas-base inferior e superior (LB_I e LB_S) propostas por Irmak et. al (2000) para a cultura do milho também apresentaram uma boa relação com a reposição hídrica da cultura do milheto. Os autores encontraram valores de CWSI para a cultura do milho, e fizeram análise de regressão entre os valores de CWSI e a produtividade da cultura em função da reposição hídrica, obtendo uma forte correlação entre esses dois fatores com R^2 de 0,98 para o modelo de regressão quadrática.

Figura 21. CWSI estimado para a cultura do milheto. Letras diferentes diferem no teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.5.3 CWSI x Potencial de água na folha

O CWSI estimado, obtidos dos cálculos que envolveram os dados da temperatura do ar e temperatura da folha foi correlacionado com as medidas de potencial de água na folha do milheto, o que pode ser visto na Figura 22. Os modelos linear, quadrático e cúbico obtiveram ajustes muito semelhantes, portanto, no gráficoéapresentadosomente o modelo de regressão linear simples, que é mais prático. O coeficiente de regressão R^2 de 0,64 indica queexiste umarazoávelcorrelação entre o CWSI e o potencial de água nas folhas do milheto. Provavelmente as medidas pontuais de temperatura do canhão de infravermelho nas folhas do milheto, ficaram sujeitas à variação da posição das folhas com relação ao ângulo de incidência do sol, o que aumentou a variabilidade dos dados e diminuiu o valor de R^2 , como pode ser observado nas

Figuras 20c e 20d a variabilidade da temperatura nas folhas individuais dentro do dossel das plantas.

Este valor corrobora com o resultado relatado por Bellvert et al. (2014), que estudaram a relação entre o CWSI obtido a partir do uso de imagens termais de um veículo aéreo não tripulado (VANT) e o potencial de água na folha de videira, encontrando um valor de R^2 de 0,71.

Costa, (2016), avaliando a relação entre o CWSI observado a partir de leituras de temperatura foliar com canhão infravermelho e o potencial de água na folha, obteve forte correlação entre essas duas variáveis, com coeficiente de determinação R^2 de 0,82 para o modelo de regressão linear simples. Já para o modelo de regressão cúbica, obteve um R^2 de 0,90. Ao estudar o CWSI de oliveiras com o uso de imagens térmicas, Berni et al. (2009), relacionaram o CWSI obtido com o potencial de água na folha das oliveiras. Os autores verificaram forte correlação entre estas duas variáveis ($R^2 = 0,82$). Este resultado indica que o CWSI pode ser usado como um bom indicador para avaliar o status hídrico no dossel de culturas plantadas em renque.

Usando imagens térmicas para definir o CWSI na cultura do algodoeiro, Cohen et. Al (2014), ao obter os valores de CWSI, correlacionou com os valores de potencial de água na folha do algodoeiro, obtendo uma boa correlação, com valor de R^2 de 0,70.

Figura 22. Relação entre CWSI e o potencial de água na folha (MPa) para os tratamentos de L40, L70, L100 e L130 na cultura do milho.

4.6 Produção de biomassa

De acordo com a análise de variância (Tabela 11) houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade nos tratamentos de irrigação para produção de matéria seca total de parte aérea.

Tabela 11. Resumo da análise de variância para matéria seca total de parte aérea para os diferentes tratamentos de irrigação no milho.

	GL	SQ	QM	Fc
Tratamento	3	137273	45758	33.564*
Bloco	3	3147	1049	0.769 ^{ns}
Resíduo	57	77707	1363	
Total	63	218127		
CV			14,2%	

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrado; QM: Quadrado médio; CV: Coeficiente de variação; *: Significativo ao nível de 5% de significância; ns: Não Significativo

Os valores de matéria seca total representa a biomassa seca da parte aérea em gramas por unidades experimentais (Parcelas), a produção média de biomassa seca obtida foi de 308 e 292 g para os níveis de reposição hídrica de 130 e 100%, os mesmos não diferiram estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade, no entanto diferiram nos níveis de 70 e 40% para as condições experimentais e apresentaram os maiores valores de produção de biomassa seca. Já o nível de reposição de 40% proporcionou o menor valor de biomassa ficando com produção média de 188 g o que corresponde uma redução de 55,33% quando comparado com o nível de 100% e o nível de 70% de reposição que apresentou uma produção média de 250 g, e sua redução foi de 16,8% quando comparada com a de 100%.

Vale salientar que com recursos hídricos cada vez mais escassos a demanda por estratégias de manejo na produção torna-se cada vez mais necessárias, na (Figura 23) pode-se observar a importância do uso da irrigação na maximização da produtividade, fazendo com que os níveis de produtividades aumentem, melhorando assim a eficiência no sistema de produção.

Figura 23. Valores de produtividade de biomassa seca por parcela. Letras diferentes diferem entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Na Figura 24 são apresentadas as estimativas de produtividade de biomassa seca em Mg ha^{-1} , os maiores valores encontrados foram nos tratamentos L100 e L130, ficando com valores de 11,52 e 11,95 Mg ha^{-1} de matéria seca. Os resultados obtidos apontam valores acima dos encontrados por Pires et al. (2007) e Spehar (1999) que encontraram produtividade de 8,12 e 5,5 Mg ha^{-1} com a cultivar BN2, que é uma cultivar que apresenta características agrônômicas semelhantes a avaliada no presente trabalho.

A variável biomassa fresca (Figura 25), indica o peso em Mg de matéria fresca por área colhida. Nessa condição foi adotado a área útil da caixa de 0,261 m^2 e um estande de 230 mil plantas ha^{-1} para que a extrapolação dos valores pudesse ser encontrada. As maiores produções de biomassa fresca foram obtidas nos tratamentos L100 e L130 apresentando valores de 59,2 e 55,6 t ha^{-1} , e estatisticamente iguais entre si, e diferenciando-se das demais, já a mínima produção encontrada foi com tratamento L40 com 35,3 ha^{-1} o que corresponde uma redução de 36,15% quando comparado com o tratamento L100. Os resultados obtidos corroboram com os encontrados por Pires et al. (2007) com a cultivar ADR500 que apresentou produtividade de 60 Mg ha^{-1} com ciclo de produção de 60 dias.

Figura 24. Valores de produtividade de biomassa seca aérea estimada (Mg ha^{-1}) para os níveis de reposição hídrica 40, 70, 100 e 130%, para um período de cultivo de 60 dias. Letras diferentes diferem entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Figura 25. Valores de produtividade de biomassa fresca aérea estimada (Mg ha^{-1}) para os níveis de reposição hídrica 40, 70, 100 e 130%, para um período de cultivo de 60 dias. Letras diferentes diferem entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

4.7 Produtividade da água para biomassa

De acordo com a análise de variância, houve diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade para produtividade da água para biomassa dentro dos tratamentos, o que pode ser visto na Tabela 12. Não houve efeito significativo para bloco.

Tabela 12. Resumo da análise de variância para produtividade de biomassa em canos diferentes tratamentos de irrigação no milho.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Tratamento	3	181,987	60,662	59,725*
Bloco	3	3,790	1,263	1,244 ^{ns}
Resíduo	57	57,895	1,016	
Total	63	243,672		
CV			15,35%	

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrado; QM: Quadrado médio; CV: Coeficiente de variação; *: Significativo ao nível de 5% de significância; ns: Não Significativo

A variável produtividade da água para biomassa – PAB é a relação entre a produção de biomassa seca da parte aérea em quilograma – kg e o volume de água utilizado pela planta em metros cúbicos – m^3 , apresentando unidade de $(kg\ m^{-3})$ e são apresentadas na Figura 26. Os maiores valores de PAB foram observados nos menores níveis de reposição hídrica, como o nível de 40% que apresentou uma PAB média de $9,11\ kg\ m^{-3}$, já o nível de reposição que apresentou a menor PAB foi o de 130% com $4,58\ kg\ m^{-3}$. Já o nível de reposição que representa 100% da capacidade de campo apresentou valor de PAB de $5,65\ kg\ m^{-3}$. Vale ressaltar que o comportamento apresentado pela PAB foi inversamente proporcional ao nível de reposição hídrica aplicado, onde a máxima redução em relação aos tratamentos impostos foi de 60%. Todos os níveis de reposição hídrica apresentaram diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade

A literatura cita valores menores de produtividade de água para a cultura do milho. Os resultados citados por Zegada-Lizarazuet al. (2005), ao estudarem a cultura do milho sob diferentes regimes hídricos, mostram que a produtividade de água na cultura para plantas sem restrições hídricas e em déficit hídrico foram de $3,91\ kg\ m^{-3}$ e $4,19\ kg\ m^{-3}$, respectivamente, esta diferença pode ser explicada pelo fato do sistema de irrigação utilizado na condição experimental desta dissertação ser o gotejamento, o que evitaria perdas de água por retenção foliar e por evaporação no momento de aplicação da água. Já os resultados citados por Payne et al. (1992), ao testar a relação entre a eficiência no uso da água e diferentes níveis de fósforo na cultura do milho, obteve valores máximos de eficiência no uso da água com base na transpiração em milho próximos de $9,0\ kg\ m^{-3}$.

No Brasil, são poucos os relatos de estudos com eficiência no uso da água para milho. Tabosa et al. (1999), cita valores para eficiência no uso da água em kg m^{-3} na faixa de 3,1 a 3,54.

Figura 26. Valores de produtividade de água para matéria seca da parte aérea total (kg m^{-3}) para os níveis de reposição hídrica 40, 70, 100 e 130%. Letras diferentes diferem entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os resultados analisados neste trabalho, demonstram que as reduções nos níveis de reposição hídrica podem ser utilizadas para melhorar a PAB, no entanto vale salientar que o rendimento de biomassa da parte aérea na cultura do milho apresentou reduções significativas na produtividade de até 35,53% da produtividade quando o nível de reposição chegou a 40%. Nas reposições de 70% as reduções na produtividade chegaram a 14,44%. A PAB no milho apresentou uma resposta exponencial positiva em relação à imposição dos tratamentos, a redução do nível de reposição de 100 para 40% incrementou um ganho na PAB de 51,9%. Segundo Araya et al. (2011) a produtividade da água pode ser usada para determinar níveis de satisfatório de redução no volume de água aplicado quando o intuito é manejo da irrigação com níveis deficitários visando garantir rendimento regular na área total. Já Ali e Talukder (2008) menciona que esse manejo poderá ser adotado quando o irrigante apresenta baixo volume de água armazenado, o que implica em necessidades plenas de aplicação de níveis abaixo da capacidade de campo.

É interessante observar que para a cultura da cana-de-açúcar, Barbosa (2015), verificou que a produtividade da água independe do nível de reposição hídrica no solo e que a PAB média

entre oito variedades avaliadas no seu trabalho foi de $5,29 \text{ kg m}^{-3}$. Entretanto, os resultados obtidos neste trabalho demonstraram que para a cultura do milho, a produtividade da água é dependente do nível de reposição hídrica no solo, e a PAB média para a cultura demonstrou ser superior, com valor médio de $6,56 \text{ kg m}^{-3}$.

Todavia vale advertir que para uma tomada de decisão como essa, outros fatores devem ser levados em consideração, como uma análise econômica da atividade, onde diversas variáveis como por exemplo valor da água, valor do custo de produção, podem tornar limitante e merecendo assim cuidados redobrados para garantia de bons resultados, ou seja, deve-se priorizar a máxima eficiência para cada condição de manejo na irrigação (LIMA JUNIOR et al., 2011).

5. CONCLUSÕES

Considerando as condições experimentais em que o presente estudo foi executado, bem como, com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que:

- 1) A cultura do milho responde bem em produtividade de biomassa à irrigação, havendo maiores produtividades para os tratamentos de maior disponibilidade hídrica. A produtividade de biomassa seca aérea variou de 7,2 a 12 toneladas por ha, para um período de cultivo total de 60 dias, e níveis de reposição hídrica entre 40 e 130 %
- 2) Confirmou-se a hipótese inicial da dissertação de que a produtividade da água na cultura do milho aumenta à medida que a disponibilidade hídrica no solo é reduzida. A faixa de produtividade da água variou de 4,5 a 9,0 Kg de biomassa seca aérea por m³ de água evapotranspirada no sistema de irrigação por gotejamento.
- 3) O CWSI teve uma boa correlação ($R^2 = 0,64$) com o potencial de água na folha, evidenciando ser um indicador adequado de estresse hídrico para as plantas de milho no campo.
- 4) A cultura do milho apresentou boa resposta termal do dossel aos níveis de estresse hídrico implementados no experimento. A diferença máxima observada de temperatura entre os tratamentos de reposição hídrica mais contrastantes foi de aproximadamente 6°C.

REFERÊNCIAS

- Ali, M. H., & Talukder, M. S. U. (2008). Increasing water productivity in crop production—a synthesis. **Agricultural water management**, 95(11), 1201-1213.
- Andrews, D. J., & Kumar, K. A. (1992). Pearl millet for food, feed, and forage. **Advances in Agronomy**, 48, 89-139.
- ANDREWS, D. J.; RAJEWSKIM, J. F. (1995). Origin, characteristics and use of pearl millet. In: Georgia University/USDA, National Grain Pearl Millet. **Tifton**. University of Georgia/USDA. p.1-4
- Araya, A., Stroosnijder, L., Girmay, G., & Keesstra, S. D. (2011). Crop coefficient, yield response to water stress and water productivity of teff (*Eragrostis tef* (Zucc.). **Agricultural water management**, 98(5), 775-783.
- Barbosa, F. S. (2015). **Produtividade de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento: interações entre variedades, lâminas e intensidade do déficit hídrico na fase de maturação**. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.
- Bellvert, J., Zarco-Tejada, P. J., Girona, J., & Fereres, E. (2014). Mapping crop water stress index in a ‘Pinot noir’ vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. **Precision agriculture**, 15(4), 361-376.
- Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P. J., Sepulcre-Cantó, G., Fereres, E., & Villalobos, F. (2009). Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 11, p. 2380-2388, 2009.
- Bianchi, C. A. M. (2004). **Avaliação de indicadores da condição hídrica em milho sob diferentes níveis de água, em semeadura direta e convencional** (Doctoral dissertation, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)..
- Boer, C. A., de Assis, R. L., Silva, G. P., Braz, A. J. B. P., de Lemos Barroso, A. L., Cargnelitti Filho, A., & Pires, F. R. (2007). Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 42(9), 1269-1276.
- Bos, M. G., Murray-Rust, D. H., Merrey, D. J., Johnson, H. G., & Snellen, W. B. (1993). Methodologies for assessing performance of irrigation and drainage management. *Irrigation and drainage systems*, 7(4), 231-261.
- Boyer, J. (1970). Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean, and sunflower at various leaf water potentials. **Plant physiology**, 46(2), 233-235.
- Braz, A. J. B. P., Kliemann, H. J., & da Silveira, P. M. (2007). Produção de fitomassa de espécies de cobertura em Latossolo Vermelho distroférrico. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)**, 35(1), 55-64.
- Brunk, J. N. (1977). A systematic study of *Pennisetum* sect. *Pennisetum* (Gramineae). **American Journal of Botany**, 161-176.
- Buso, W. H. D., Machado, A. S., Borges, L., & de Souza França, A. F. (2011). Uso do milheto na alimentação animal. **PUBVET**, 5, Art-1136.
- CATELAN, F. (2010). **Avaliação de grãos de milheto (*Pennisetum glaucum*) na alimentação de coelhos em crescimento**. 2010. 52f (Doctoral dissertation, Tese (Doutorado em Zootecnia)-Universidade Estadual de Maringá, PR. [Links]).
- Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M., Saranga, Y., & Tsipris, J. (2005). Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, n. 417, p. 1843-1852, 2005.

- Craufurd, P. Q., & Bidinger, F. R. (1988). Effect of the duration of the vegetative phase on shoot growth, development and yield in pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke). **Journal of Experimental Botany**, 39(1), 124-139.
- da Silva Paz, V. P., Teodoro, R. E. F., & Mendonça, F. C. (2000). Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 4(3), 465-473.
- Daughtry, C. S. T. Direct measurement of canopy structure. In: Goel, N. S., & Norman, J. M. (1990). **Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions**. Taylor & Francis.
- de Melo, R. F., Gruber, Y. B. G., & Coelho, R. D. (2007). Efeito do armazenamento das amostras para determinação do potencial da água na folha pela câmara de pressão. **Irriga**. Botucatu, SP. 12(3): 226 – 237.
- de Oliveira Costa, J. (2016). **Padrões de resposta termal ao déficit hídrico na cultura do café irrigado por gotejamento** (Doctoral dissertation, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”).
- EMBRAPA MILHO E SORGO. **A Cultura do Milheto**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/491152/1/Milheto.pdf>. Acesso em: 11 mar 2016.
- EMBRAPA MILHO E SORGO. **RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS TECNOLOGIAS GERADAS PELA EMBRAPA. Cultivar de Milheto BRS 1503**. Sete Lagoas, MG. 2016. Disponível em: http://bs.sede.embrapa.br/2015/relatorios/milhoesorgo_2015_milheto.pdf
- Fancelli, A. L., & Dourado-Neto, D. (1997). Fenologia do milho. *FANCELLI, AL; DOURADO-NETO, D. (Coords.). Tecnologia da produção de milho*. Piracicaba: Publique, 131-140.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United States). **FAOSTAT**. FAO Statistics Division. Disponível em: <http://faostat3.fao.org>. Acesso em: 10/04/2017.
- Favarin, J. L., Dourado Neto, D., García, A. G., Villa Nova, N. A., & Favarin, M. G. G. V. (2002). Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 37(6), 769-773.
- Fernandes, E. J. (2010). Determinação do índice de estresse hídrico em cultura do feijoeiro com termômetro de infravermelho. **Irriga**, 15(3), 248.
- Frizzone, J. A., Freitas, P. D., Rezende, R., & Faria, M. D. (2012). Microirrigação: gotejamento e microaspersão. Maringá: **Eduem**.
- Geraldo, J., Rossiello, R. O. P., Araújo, A. P., & Pimentel, C. (2000). Diferenças em crescimento e produção de grãos entre quatro cultivares de milheto pérola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 35(7), 1367-1376.
- Goldsworthy, P. R., & Fisher, N. M. (1984). The physiology of tropical field crops.
- Guimarães, C. M., Stone, L. F., & Brunini, O. (2006). Adaptação do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 10(1), 70-75.
- Heringer, I. (1995). **Efeitos de níveis de nitrogênio sobre a dinâmica de uma pastagem de milheto (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke) sob pastejo**. 183 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Hsiao, T. C. (1973). Plant responses to water stress. **Annual review of plant physiology**, 24(1), 519-570.
- Irmak, S., Haman, D. Z., & Bastug, R. (2000). Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. **Agronomy Journal**, 92(6), 1221-1227.
- Jackson, R. D. (1982). Canopy temperature and crop water stress. **Advances in irrigation**, 1, 43-85.
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter, P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water resources research**, 17(4), 1133-1138.

- Jackson, R. D., Kustas, W. P., & Choudhury, B. J. (1988). A reexamination of the crop water stress index. *Irrigation Science*, 9(4), 309-317.
- KICHEL, A., & MIRANDA, C. (2000). Uso do milheto como planta forrageira. *Circular Técnica*, (46).
- LEONG, W. **Canopy modification and its effects on the growth and yield of *Hevea brasiliensis* Muell. Arg.** 1980. 283 p (Doctoral dissertation, Thesis (Ph. D.)-Faculty of Agriculture Sciences of Ghent, Ghent).
- Lima Junior, J. A. D., Pereira, G. M., Geisenhoff, L. O., Costa, G. G., Reis, R. P., & Oliveira, L. F. C. D. (2011). Avaliação econômica da produção de alface americana em função de lâminas de irrigação. *Ciênc. agrotec., (Impr.)* 35(2), 392-398.
- MAGGIOTTO, S. **Estimativa da evapotranspiração de referência pelo uso da termometria ao infravermelho.** Piracicaba, (1996). 71p (Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo).
- MAITI, R., & BINDER, F. Growth and development of the pearl millet plant. Patancheru, **International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics**, 1981. 14p. *Research Bulletin*, 6.
- Mantovani, E. C. (2002). Avalia: manual do usuário. **Viçosa: DEA/UFV-PNP&D/café Embrapa.**
- Marcante, N. C., Camacho, M. A., & Junior, F. P. P. (2011). Teores de nutrientes no milheto como cobertura de solo = Nutrient content in millet as cover crop. *Bioscience Journal*, 27(2).
- Martin, D., van Brocklin, J., & Wilmes, G. (1989). Operating rules for deficit irrigation management. *Transactions of the ASAE*, 32(4), 1207-1215.
- Martin, J. D., Carlesso, R., Aires, N. P., Gatto, J. C., Dubou, V., Fries, H. M., & Scheibler, R. B. (2012). Irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de silagem de milho. *Irriga*, 1(01), 192.
- Martins, J. D., Carlesso, R., Knies, A. E., de Oliveira, Z. B., Broetto, T., & Rodrigues, G. J. (2010). Potencial hídrico foliar em milho submetido ao déficit hídrico. *Irriga*, 15(3), 324.
- McGuire, M. J., Balick, L. K., Smith, J. A., & Hutchison, B. A. (1989). Modeling directional thermal radiance from a forest canopy. **Remote Sensing of Environment**, 27(2), 169-186.
- Metcalf, D. S., Elkins, D. M., & Hughes, H. D. M. (1980). Crop production: principles and practices. Macmillan.
- Nagaz, K., Toumi, I., Mahjoub, I., Masmoudi, M. M., & Mechli, N. B. (2009). Yield and water use-efficiency of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) under deficit irrigation with saline water in arid conditions of Southern Tunisia. **Research Journal of Agronomy**, Islamabad, 3(1), 9-17.
- Netto, D. A. M. (1998). A cultura do milheto. Sete Lagoas: Embrapa CNPMS. **(Comunicado técnico, 11)**
- Nogueira, R. J. M. C. (1997). Expressões fisiológicas da aceroleira (*Malpighia emarginata* DC) em condições adversas. **São Carlos-SP: UFSCar.**
- Payne, W. A. (2000). Optimizing crop water use in sparse stands of pearl millet. **Agronomy Journal**, 92(5), 808-814.
- Payne, W. A., Malcolm, D. C., Hossner, L. R., Lascano, R. J., Onken, A. B., & Wendt, C. W. (1992). Soil phosphorus availability and pearl millet water-use efficiency. **Crop Science**, 32(4), 1010-1015.
- Pereira Filho, I. A., FERREIRA, A. D. S., Coelho, A. M., Casela, C. R., Karam, D., Rodrigues, J. A. S., ... & Waquil, J. M. (2003). **Manejo da cultura do milheto.** EMBRAPA milho e sorgo.
- Pereira, A. R., Nova, N. A. V., & Sedyama, G. C. (1997). **Evapo (transpi) razão** (Vol. 183). Piracicaba: Fealq.
- Pereira, L. S., Oweis, T., & Zairi, A. (2002). Irrigation management under water scarcity. **Agricultural water management**, 57(3), 175-206.
- Pereira, L. S., Oweis, T., & Zairi, A. (2002). Irrigation management under water scarcity. **Agricultural water management**, 57(3), 175-206.

- Perry, C. J. (1996). Quantification and measurement of a minimum set of indicators of the performance of irrigation systems. **Colombo, Sri Lanka: International Irrigation Management Institute. Duplicated.**
- Pires, F. R., de Assis, R. L., Silva, G. P., Braz, A. J. B. P., Santos, S. C., Neto, S. A. V., & de Sousa, J. P. G. (2007). Desempenho Agrônomo de variedades de milho em razão da fenologia em pré-safra. **Bioscience Journal**, 23(3).
- Raij, B. V., Cantarella, H., Quaggio, J. A., & Furlani, A. M. C. (1997). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC.
- Ramírez, A. J. F., Coelho, R. D., Pizani, M. A. M., & da Silva, C. J. (2015). Determinação do índice de estresse hídrico em tomateiros cereja (*Lycopersicon esculentum* var *cerasiforme*) com câmara infravermelha. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, 9(4), 218.
- Rodrigues, P. B., Rostagno, H. S., Albino, L. F. T., Gomes, P. C., Barboza, W. A., & Santana, R. T. (2001). Valores energéticos do milho, do milho e subprodutos do milho, determinados com frangos de corte e galos adultos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 30(6), 1767-1778.
- Salton, J. C., & Kichel, A. N. (1997). Milho: alternativa para cobertura do solo e alimentação animal.
- Santos, R. D. (2014). **Desempenho agrônomo, valor nutricional e modelagem de respostas produtivas e fisiológicas de cultivares de milho no semiárido**. (Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais).
- Scanavini, J. G. V. (2014). **Estratégias de irrigação para viveiros de cana-de-açúcar com mudas provenientes de micropropagação (Biofábrica)** (Dissertação de mestrado, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz").
- Scholander, P. F., Hammel, H. T., Hemmingsen, E. A., & Bradstreet, E. D. (1964). Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 52(1), 119-125.
- Singh, B. R., & Singh, D. P. (1995). Agronomic and physiological responses of sorghum, maize and pearl millet to irrigation. **Field Crops Research**, 42(2), 57-67.
- Spehar, C. R. (1999). Sistemas de produção de milho nos Cerrados. In **WORKSHOP INTERNACIONAL DE MILHETO** (pp. 187-195).
- Stockle, C. O., & Dugas, W. A. (1992). Evaluating canopy temperature-based indices for irrigation scheduling. **Irrigation Science**, 13(1), 31-37.
- Tabosa, J. N., Lima, G. S., Lira, M. A., Tavares, J. J. F., & Brito, A. R. M. B. (1999). Programa de melhoramento de sorgo e milho em Pernambuco. *QUEIROZ, MA; GOEDERT, CO; RAMOS, SRR Recursos genéticos e melhoramento de plantas para o Nordeste brasileiro*. Petrolina-PE: Embrapa Semi-Árido, 1-29.
- Torres, J. L. R., & Pereira, M. G. (2008). Dinâmica do potássio nos resíduos vegetais de plantas de cobertura no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32(4), 1609-1618.
- Trentin, R. (2010). **Estimativa de um índice de estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar com base na temperatura foliar**. (2010). 61 p (Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola)– Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG).
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, 44(5), 892-898.
- Viets, F. G. (1962). Fertilizers and the efficient use of water. **Advances in Agronomy**, 14, 223-264.
- Watson, D. J. (1958). The dependence of net assimilation on leaf area index. **Annals of Botany**, 22(85).

- Welles, J. M. (1990). Some indirect methods of estimating canopy structure. **Remote sensing reviews**, 5(1), 31-43.
- Welles, J. M., & Cohen, S. (1996). Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. **Journal of Experimental Botany**, 47(9), 1335-1342.
- Xavier, A. C., & Viane, J. S. (2002). Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, 26(4), 421-427.
- Zegada-Lizarazu, W., & Iijima, M. (2005). Deep root water uptake ability and water use efficiency of pearl millet in comparison to other millet species. **Plant Production Science**, 8(4), 454-460.