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

**Imagens termais: detecção espacial de estresse hídrico nas plantas e suas
relações fisiológicas com a produção agrícola**

Timóteo Herculino da Silva Barros

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2019

Timóteo Herculino da Silva Barros
Engenheiro Agrônomo

**Imagens termais: detecção espacial de estresse hídrico nas plantas e suas relações fisiológicas
com a produção agrícola**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícola

Piracicaba
2019

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

Barros, Timóteo Herculino da Silva

Imagens termais: detecção espacial de estresse hídrico nas plantas e suas relações fisiológicas com a produção agrícola / Timóteo Herculino da Silva Barros. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2019.

147 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Termografia por infravermelho 2. Manejo da irrigação 3. Estresse hídrico
4. Trocas gasosas I. Título

Aos meus queridos e amados pais, **Sebastião** e **Maria**, pela família maravilhosa que construíram e pelo dom de nos estimular a fazer o bem, sermos justos e perseverantes em cada dia vivido. (Vocês são fontes de inspiração e luta)

À minha querida Vó **Maura** (*in memória*)

Ao meu irmão **Tiago**

À minha querida companheira Flávia.

Vocês sempre serão minha referência e meu orgulho!

Dedico

AGRADECIMENTOS PESSOAIS

A Deus, pelo dom da vida, pela força em cada momento nas realizações dos meus sonhos; sem dúvida, esse é mais um deles.

Ao meu pai, Sebastião, e à minha mãe, Maria, pelo apoio constante de vocês e pelo carinho; sem dúvida, a força que dada por vocês tornou meus passos mais fáceis, vocês são minha inspiração.

Ao meu irmão, Tiago, meu exemplo de luta e determinação, saiba que minha vitória é sua vitória.

A todos os meus familiares que, de forma direta ou indireta, contribuem na minha vida, obrigado pelo apoio de vocês.

À minha querida namorada, Flávia. Suas palavras, seu companherismo, seu apoio, seu carinho e sua determinação contribuíram de forma ininterrupta para meu sucesso.

A todos os meus amigos de graduação e meu amigos de infância: Fernando, Uilson, Edson (Chapolin), Fábio, Sergio, Seneval, Ricardo, Silvino, Célio (*in memoria*), Gene e todos os demais.

A todos os professores que contribuíram e contribuem na minha formação, obrigado.

Aos meus amigos e companheiros de repúblicas, jornada e de vida: Arthur Prudêncio, Luiz Aníbal, Bruno Augusto, Adijailton, Pedro Andrade, Rony, Mateus, Christopher, Mineirinho, Diogo (Judeuzinho), Marquinhos, Everton, Luciano e Ótávio.

AGRADECIMENTOS PROFISSIONAIS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho, por acreditar e confiar no meu trabalho durante todos esses anos de trabalho em conjunto. Os conselhos, as orientações e os bons cafezinhos seguidos de ótimas conversas durante esse período transformaram-se, acima de tudo, em uma verdadeira amizade, e sou muito grato por tudo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), juntamente com a Odebrecht Agroindustrial, empresa parceira no projeto PITE (BIOEN) 2012/50083-7, e à Universidade de São Paulo - USP (Instituição sede do projeto), obrigado.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas ESALQ/USP, pela oportunidade de fazer parte desta equipe.

A todos os meus amigos parceiros de trabalho, Ailson Maciel de Almeida, Daniel Philipe Veloso Leal, Eusímio Felisbino Fraga Junior, Lucas da Costa Santos, Fernando Silva Barbosa, Nathália Lopes Ribeiro, Alex Nunes, Jefferson Oliveira, Jonathan Vasquez, Marcos Amaral e Vinicius Perin; sem vocês nada disso seria possível, obrigado a toda equipe.

Aos meus orientadores de graduação: Dr. Renato Molica, Dr. Jaime Cabral, Dr. Jeaderson, Dra. Edilma e todos todos os professores que contribuíram na minha formação.

Aos meus amigos de pós-graduação: Jefferson Vieira (Tudão), Osvaldo, Wagner, João, Otávio, Eder, Luiz, Bruno Lema, Asdrubal, Maria Alejandra, Acácio, Hermes, José Guilherme, Bruno Araújo, Luiz Sobenko, Diego, Catarina, Fabiani Bender, Henrique Boriolo, Arthur Canuto, Verônica, Ângelo, Danielle, Flávio, Junior, Luciano Sobral, Simone, Fernanda, Elizabeth, Jéssica Gárcia, Brenda, Rubmara, Marcos, Ana, Thaís, Adriano, Tarcio e Thuane, que contribuíram diretamente e indiretamente nos meus projetos, obrigado a todos vocês.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas, em especial aos que participaram diretamente da minha formação e da condução do experimento. Às secretárias; Angela, Beatriz, Fernanda e Davilmar; aos funcionários: Fernando, Afonso (*in memoriam*), Agnaldo, Sr. Antonio, Áureo, Gilmar, Hélio, José Geraldo, Juarez, Luiz e Paulinha, obrigado.

Aos professores Sérgio Nascimento Duarte, Eusímio Felisbino Fraga Júnior e Helaine Carrer, agradeço pelas contribuições que tiveram durante meu exame de qualificação, sugerindo e apoiando as mudanças necessárias para a realização deste trabalho, ao professor Fernando Mendonça. Também agradeço aos demais professores do Departamento de Engenharia de Biossistemas, pelos ensinamentos e confiança.

Agradeço a todos que de forma direta ou indireta participaram dessa fase da minha vida, ajudando, orientando, obrigado a cada um.

“A mais bela coisa que podemos vivenciar é o mistério. Ele é fonte de qualquer arte verdadeira e qualquer ciência. Aquele que desconhece esta emoção, aquele que não para mais para pensar e não se fascina, está como morto: seus olhos estão fechados”.

Albert Einstein

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
RESUMO GRÁFICO.....	10
INTRODUÇÃO (PREFÁCIO)	11
1 USO DA TERMOGRAFIA NA MENSURAÇÃO DE IMPACTOS DO ESTRESSE ABIÓTICO SOBRE A CULTURA DO MILHETO IRRIGADO	13
RESUMO.....	13
ABSTRACT.....	13
1.1 INTRODUÇÃO.....	14
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	18
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
1.4 CONCLUSÕES.....	36
REFERÊNCIAS.....	37
2 INFLUÊNCIA DO ESTRESSE HÍDRICO NA PRODUÇÃO DE CARQUEJA (<i>BACCHARIS CRISPA</i> SPRENG.): ABORDAGEM TERMO-FISIOLÓGICA.....	46
RESUMO.....	45
ABSTRACT.....	45
2.1 INTRODUÇÃO.....	47
2.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
2.3 CONCLUSÕES.....	67
REFERÊNCIAS.....	68
3 INFLUÊNCIA DOS NÍVEIS DE MANEJO DE IRRIGAÇÃO NAS QUESTÕES FISIOLÓGICAS DE TROCAS GASOSAS EM CAFEIEIRO (<i>COFFEA ARABICA</i> L.).....	80
RESUMO.....	79
ABSTRACT.....	79
3.1 INTRODUÇÃO.....	81
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	84
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
3.4 CONCLUSÕES.....	99
REFERÊNCIAS.....	99
4 IMAGENS TÉRMICAS APLICADA AO AMENDOIM IRRIGADO (<i>ARACHIS HYPOGAEA</i> L.) PARA O DIAGNÓSTICO DO ESTRESSE HÍDRICO	108
RESUMO.....	13
ABSTRACT.....	107
4.1 INTRODUÇÃO.....	109
4.2 MATERIAL E METODOS.....	113
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	119
4.4 CONCLUSÕES.....	130
REFERENCIAS.....	131

RESUMO

Imagens termais: detecção espacial de estresse hídrico nas plantas e suas relações fisiológicas com a produção agrícola

A termografia por infravermelho é uma opção avançada de gerenciamento agrícola para investigar o estresse hídrico antecipadamente à detecção visual, evitar declínios no rendimento das culturas e, ao mesmo tempo, avaliar a variabilidade espacial e temporal no status hídrico das plantas. Neste trabalho apresenta-se uma coletânea de estudos sobre a utilização de imagens termais do dossel vegetal em diferentes culturas de interesse comercial, feitos para investigar as condições fisiológicas do estresse abiótico (hídrico) sobre a produtividade da água, e também as relações de trocas gasosas entre as plantas e a atmosfera. Os experimentos foram realizados em casa de vegetação na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) em Piracicaba, SP. Os tratamentos consistiram em níveis de reposição hídrica baseados em um tratamento testemunha (Nível 100% θ_{cc}), com lâmina d’água aplicada para retornar a umidade do solo à capacidade de campo (θ_{cc}). Assim, o tratamento Nível 100% θ_{cc} foi estabelecido como condição ótima e os demais tratamentos foram frações do tratamento testemunha.. As trocas gasosas (H_2O e CO_2) realizadas pelas plantas foram medidas com o auxílio de um sistema de analisador de gases por infravermelho e o efeito do estresse hídrico foi mesurado por meio da determinação do *Crop Water Stress Index* (CWSI), calculado com base em imagens térmicas de câmera infravermelha. Foram observadas variações significativas (teste Tukey, $p < 0,05$) da temperatura foliar de acordo com o nível de reposição hídrica. Houve correlações significativas entre as variáveis fisiológicas e a variação da temperatura da cultura T_c e do ar T_a ($T_c - T_a$); e entre a produtividade e o CWSI, de acordo com o nível de reposição hídrica. Os resultados mostraram que as culturas sob estresse hídrico apresentam reduções na taxa de assimilação de CO_2 ; paralelamente, houve reduções na condutância estomática e na taxa de transpiração. Embora concebido como um índice de estresse hídrico, o CWSI apresentou boa correlação com os parâmetros fisiológicos e com a produtividade das culturas estudadas. O índice pode ser uma ferramenta de análise da variabilidade espacial do estresse hídrico das plantas. Posteriormente, pode-se correlacionar essa variabilidade com os aspectos fisiológicos envolvidos, que resultam em queda da produtividade agrícola.

Palavras-chave: Termografia por infravermelho, Manejo da irrigação, Estresse hídrico, Trocas gasosas

ABSTRACT

Thermal images: spatial detection of water stress in plants and their physiological relationships with agricultural production

Infrared thermography is an advanced agricultural management option for investigating water stress in advance of visual detection, avoiding declines in crop yields, and at the same time assessing spatial and temporal variability in the crop water status. This work presents a collection of studies on the use of thermal images of vegetal canopies from different crops of commercial interest, made to investigate the physiological conditions of the abiotic (water) stress on the water productivity, as well as the relations of gas exchanges between the plants and the atmosphere. The experiments were carried out in a greenhouse at the "Luiz de Queiroz" School of Agriculture (ESALQ / USP) in Piracicaba, SP. The treatments consisted of water replenishment levels based on a control treatment (Level 100% θ_{cc}), with a water depth applied to return soil moisture to field capacity (θ_{cc}). Thus, the 100% θ_{cc} treatment was established as the optimal condition, and the other treatments were fractions of the control treatment. The gas exchanges (H_2O and CO_2) made by the crops were measured using an infrared gas analyzer system, and the effect of water stress was measured by determining the Crop Water Stress Index (CWSI), calculated on the basis of thermal infrared camera images. Significant variations (Tukey's test, $p < 0.05$) of leaf temperature were observed according to the level of water replenishment. There were significant correlations between the physiological variables and ($T_c - T_a$); and between productivity and CWSI, according to the level of water replenishment. The results showed that crops under water stress presented reductions in the rate of CO_2 assimilation; in parallel, there were reductions in stomatal conductance and in the transpiration rate. Although conceived as an index of water stress, CWSI showed a good correlation with physiological parameters and the productivity of the studied crops. This index may be a tool of analysis of the spatial variability of crop water stress. Subsequently, this variability may be correlated with the physiological aspects involved, which results in decreases in the agricultural productivity.

Keywords: Infrared thermography, Irrigation management, Water stress, Gas exchanges

RESUMO GRÁFICO

Imagens termais: detecção espacial de estresse hídrico nas plantas e suas relações fisiológicas com a produção agrícola

Introdução (Prefácio)

A fim de atender à crescente demanda global de produção de alimentos em condições de limitação de recursos hídricos, a implementação de técnicas adequadas de manejo de irrigação é decisiva, particularmente em bacias hidrográficas sob condição de alta demanda hídrica o que está relacionado a elevados níveis de estresse hídrico nas plantas (TARJUELO et al., 2015; LIU et al., 2016; BARBOSA et al., 2017). Os capítulos descritos nessa Tese trazem uma abordagem a respeito de novas ferramentas que vêm sendo utilizadas no manejo da agricultura irrigada no Brasil e no mundo, com o objetivo de aprimorar o uso sustentável dos recursos hídricos, aliado ao aumento da eficiência de uso da água na produção agrícola.

A agricultura tem influência na vida da população mundial, seja como meio de vida, seja no fornecimento de alimentos, roupas, tecidos e outros produtos (CLARK, 2019). O setor agrícola não só tem impacto no estilo de vida das pessoas, mas também um impacto significativo sobre os recursos naturais. A utilização eficiente e sustentável é a base para manter o desenvolvimento social e econômico (IHUOMA; MADRAMOOTOO, 2017; ERCIN, 2019). A disponibilidade de água é o fator mais importante que afeta o crescimento e a produção de plantas, principalmente em regiões áridas e semiáridas, onde as plantas são frequentemente submetidas a períodos de seca (TAIZ; ZEIGER, 2015; SANTESTEBAN et al., 2017; DA SILVA BARROS et al., 2018; KHORSANDI et al., 2018a).

O déficit hídrico é um dos principais fatores abióticos que limitam a produtividade das culturas nos trópicos semiáridos, onde o rendimento das culturas diminui significativamente (FISCHER; REDDY; RAO, 2016). É possível que mudanças climáticas causem eventos inesperados de seca, o que provavelmente resultará em maiores restrições de recursos hídricos para uso agrícola, diminuindo o rendimento das culturas e aumentando a severidade das secas (PADAKANDLA, 2016; EGEE et al., 2017).

Um dos indicadores mais importantes do estresse hídrico das culturas é a temperatura do dossel, mais conhecida como temperatura foliar (JONES, 2004; GONZALEZ-DUGO; ZARCO-TEJADA; FERERES, 2014; MARIANO et al., 2016). A avaliação da temperatura do dossel é importante para o monitoramento do regime hídrico nas plantas, em virtude de sua alta demanda hídrica (TAIZ; ZEIGER, 2015; GARCÍA-TEJERO et al., 2017; BIANCHI et al., 2018). O processo de transpiração foliar, fenômeno conhecido como resfriamento evaporativo, é

condição natural para as plantas, no qual o calor é dissipado pela perda de vapor de água através dos estômatos (SINGH, 2004; ÓSIC et al., 2018; COSTA et al., 2019).

Com baixos níveis de transpiração, o processo de resfriamento evaporativo é significativamente reduzido e ocorre elevação da temperatura foliar acima da temperatura do ar. Isto possibilita a utilização de ferramentas, como sensores de radiação infravermelha, para diagnóstico desses processos (IDSO et al., 1980, 1981; JACKSON et al., 1981). A regulação estomática é peça chave na fisiologia vegetal e está intrinsecamente ligada à fotossíntese e às relações hídricas, fornecendo informações vitais sobre a capacidade de adaptação, sobrevivência e crescimento da planta. Os estômatos respondem ao estado da água no solo e na planta, bem como às condições meteorológicas prevalentes no momento. Além disso, os estômatos controlam o resfriamento decorrente do processo evaporativo nas folhas (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; ELSAYED et al., 2017).

O estado da água da planta determina sua resposta aos efeitos combinados da disponibilidade de umidade do solo, da demanda evaporativa, da resistência hidráulica interna e da capacidade de captação de água na interface raiz-planta. É um indicador mais sensível de estresse hídrico do que as medidas de umidade do solo (JONES et al., 2009; TAIZ; ZEIGER, 2015; MARIANO et al., 2016).

Os trabalhos aqui apresentados visam aprimorar a detecção remota das características de rendimento das plantas por meio da termografia por infravermelho, utilizada para mensuração da temperatura do dossel da cultura. Esta técnica apresenta correlação elevada com parâmetros fisiológicos e de produtividade das culturas, no que diz respeito à detecção do nível de estresse hídrico a que as mesmas estão sujeitas no campo (DEERY et al., 2016; GARCIA-TEJERO et al., 2017; GARCÍA-TEJERO et al., 2017; KHORSANDI et al., 2018b). Assim, pode-se identificar a variabilidade de tal estresse no campo, em escalas temporais e espaciais adequadas, antes que danos econômicos sejam visíveis (NELSON et al., 2018).

Os quatro capítulos aqui descritos apresentam informações e recomendações técnicas sobre o manejo de água em milheto, carqueja, café e amendoim.

1 USO DA TERMOGRAFIA NA MENSURAÇÃO DE IMPACTOS DO ESTRESSE ABIÓTICO SOBRE A CULTURA DO MILHETO IRRIGADO

Resumo

O milheto é um cereal de alto interesse comercial no mundo, devido à sua tolerância à seca. Outras culturas agrícolas produtoras de grãos não têm produtividades aceitáveis em regiões áridas e semiáridas. O milheto é uma cultura importante para o futuro devido aos efeitos das mudanças climáticas, que podem intensificar a amplitude e a frequência de condições de baixa disponibilidade de água nos solos. Este trabalho teve por objetivo estudar os impactos do estresse abiótico hídrico sobre a produtividade da água e sobre as relações de trocas gasosas entre o milheto e a atmosfera. O experimento foi realizado em casa de vegetação, na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), Piracicaba, SP, Brasil. Os tratamentos consistiram em quatro (04) níveis de reposição hídrica baseados em um tratamento testemunha, no qual a umidade do solo foi mantida próxima à capacidade de campo (θ_{cc}) (Nível 100% θ_{cc}), a saber: (a) 40% θ_{cc} ; (b) 70% θ_{cc} ; (c) 100% θ_{cc} ; (d) 130% θ_{cc} . As trocas gasosas (H_2O e CO_2) realizadas pelas plantas foram medidas com um sistema de analisador de gases por infravermelho. O potencial de água na folha foi coletado com câmara de pressão tipo *Scholander*. O efeito do estresse hídrico foi mensurado a partir da determinação do Índice de Estresse Hídrico da Cultura (*Crop Water Stress Index* – CWSI), calculado com base em imagens térmicas de câmara infravermelha. Os resultados mostraram que o milheto cultivado sob estresse hídrico apresentou redução nas taxas de assimilação de CO_2 ; paralelamente, houve reduções na condutância estomática e nas taxas de transpiração. Embora tenha sido concebido como um índice de estresse hídrico, o CWSI tem correlação com os parâmetros fisiológicos do milheto e com a produtividade da água em biomassa. Desta forma, este índice é uma importante ferramenta para a gestão da água, podendo ser utilizado para o monitoramento remoto da produtividade da cultura do milheto. Em baixos níveis de reposição hídrica, o milheto teve redução na produção de biomassa e aumento da produtividade da água. Isto indica que essa cultura pode ser manejada na condição de irrigação sob déficit, visando otimizar a produtividade agrícola em condição de recursos hídricos escassos.

Palavras-chave: CWSI; Produtividade da Água para Biomassa; Condutância Estomática; Potencial de Água na Folha; Taxa de Fotossíntese

Abstract

Millet is a cereal of high commercial interest in the world due to its drought tolerance. Other grain crops do not have acceptable yields in arid and semi-arid regions. Millet is an important crop to mitigate the effects of climate change, which can intensify the amplitude and frequency of low water availability conditions in soils. The objective of this work was to study the impacts of water abiotic stress on water productivity and on gaseous exchange relationships between millet and atmosphere. The experiment was carried out under greenhouse conditions at the "Luiz de Queiroz" College of Agriculture (ESALQ / USP), Piracicaba, SP, Brazil. Irrigation treatments consisted of four (4) water levels based on a reference treatment, in which soil moisture was maintained close to the field capacity soil

moisture (a) 100% θ_{cc} , the remaining treatments were fractions from the reference plot : (b) 40% θ_{cc} ; (c) 70% θ_{cc} ; (d) 130% θ_{cc} . The gas exchanges (H_2O and CO_2) carried out by the plants were measured with an infrared gas analyzer system. The water potential in the leaf was determined with a Scholander type pressure camera. The effect of water stress was measured by determining the *Crop Water Stress Index* (CWSI), calculated based on thermal images from infrared camera. The results showed that millet growing under water stress showed a reduction in CO_2 assimilation rates; in parallel, there were reductions in stomatal conductance and transpiration rates. Although it was conceived as a water stress index, the CWSI correlates with the physiological parameters of millet and water productivity in biomass. In this way, this index is an important tool for water management, and can be used for the remote monitoring of the productivity of the millet crop. At low levels of water replenishment, millet had a reduction in biomass production and an increase in water productivity. This indicates that this crop can be managed under the condition of deficit irrigation, aiming at optimizing agricultural productivity in the condition of scarce water resources.

Keywords: CWSI; Water Productivity for Biomass; Stomatal conductance; Leaf Water Potential; Photosynthesis Rate

1.1 Introdução

A disponibilidade de água é um fator importante que afeta o crescimento e a produção das plantas, principalmente em regiões áridas e semiáridas, onde as plantas são frequentemente submetidas a períodos de seca (Silva Barros, da *et al.*, 2018). Assim, o déficit hídrico é um dos principais fatores abióticos que limitam a produtividade das culturas nos trópicos semiáridos, causando redução significativa no rendimento das culturas graníferas (Fischer, Reddy e Rao, 2016). É possível que mudanças climáticas causem eventos inesperados de seca, que provavelmente resultarão em menor disponibilidade de recursos hídricos. Em consequência disto, haverá redução no rendimento das culturas e maior severidade nos efeitos da seca (Padakandla, 2016). Portanto, a segurança alimentar global sustentável e equitativa é, ao menos parcialmente, dependente do desenvolvimento de culturas agrícolas adaptadas a ambientes com escassos recursos hídricos.

As respostas morfológicas e fisiológicas que indicam o grau de adaptação ao estresse hídrico variam consideravelmente entre as espécies. Sob condições de seca, as trocas gasosas das plantas são reduzidas (CO_2 e água), o que leva a reduções do acúmulo de biomassa e do rendimento de grãos. Assim, as estratégias de manter as plantas irrigadas sob déficit hídrico são limitadas e giram em torno da necessidade de usar água de maneira eficiente, garantir que a água esteja disponível para o período de enchimento de grãos e maximizar a captura de

água no perfil do solo (Kholová *et al.*, 2010; Kusaka, Lalusin e Fujimura, 2005; Nelson *et al.*, 2018a; Souza *et al.*, 2004; Vadez *et al.*, 2013).

As culturas de interesse agrícola tolerantes à seca têm capacidade de limitar o impacto das mudanças climáticas sobre a produção e distribuição da biomassa e, consequentemente, sobre seu rendimento econômico (Fita *et al.*, 2015; Vadez *et al.*, 2013). Essa capacidade dependerá da intensidade e da duração da seca, e da fase de desenvolvimento em que ocorre o déficit hídrico (Taiz e Zeiger, 2015; Winkel, Renno e Payne, 1997).

De modo geral, a estratégia do milheto (*Pennisetum glaucum* [L.] Leeke) em condições de déficit hídrico parece ser semelhante a da maioria dos cereais; porém, o milheto é um dos cereais mais tolerantes às condições de seca (Nielsen e Vigil, 2017). Por isso é cultivado extensivamente em condições de sequeiro em regiões áridas e semiáridas propensas à seca, onde a precipitação média anual varia entre 200 e 800 mm (Brunken, Wet e Harlan, 1977; Burman *et al.*, 2011). O milheto é bem adaptado às condições de baixa disponibilidade de água, em que poucas culturas graníferas sobreviveriam (Brunken, Wet e Harlan, 1977; Burman *et al.*, 2011; Winkel, Renno e Payne, 1997). Assim, é um importante cereal nas regiões semiáridas do mundo, especialmente na África e na Índia. A FAOSTAT (2018) reportou que no ano de 2016 essa cultura foi cultivada em 31,7 milhões de hectares, quase totalmente distribuídos nos continentes Africano e Asiático (63% e 34% da área plantada, respectivamente). Os genótipos de maior rendimento sob estresse hídrico não extraem mais água do perfil do solo que os demais genótipos, mas exibem um padrão de extração de água que favorece o aumento de sua captação durante o período pós-antese, e menor absorção de água antes e durante a antese (Vadez *et al.*, 2013).

Devido à sua adaptabilidade a condições adversas, o milheto é uma alternativa para a agricultura brasileira, tanto em regiões semiáridas quanto para regiões do Cerrado. Nesta última, é usado em sistema de plantio direto, como cobertura em consórcio com leguminosas, e vem obtendo sucesso devido à sua alta produtividade de biomassa (Dias-Martins *et al.*, 2018; Oliveira, Carvalho e Moraes, 2002; Rakshit, 2016).

A principal característica da fotossíntese das plantas C4 é a existência de um mecanismo de concentração de CO₂ nas folhas, que serve para saturar a fotossíntese e suprimir a fotorrespiração no ar (Ghannoum, 2009; Martínez-Romero *et al.*, 2017; Taiz e Zeiger, 2015). Como a fotossíntese é a principal fonte de carbono e energia orgânicos para o

crescimento e a produção de biomassa, o conhecimento da relação entre condutância estomática e fotossíntese de genótipos modernos de culturas será extremamente importante para a compreensão do mecanismo que leva à maior produtividade destes genótipos, independentemente das condições climáticas (Endres *et al.*, 2010). Assim, as taxas de fotossíntese e evapotranspiração têm sido amplamente adotadas para determinar o estresse das plantas. (Yu *et al.*, 2015).

Por outro lado, a abertura estomática (condutância estomatal) pode refletir o estado da água nas plantas, e pode ser usada para indicar o grau de estresse hídrico e a capacidade de tolerância à seca (Yu *et al.*, 2015). Como a condutância estomática é altamente variável, é difícil de comparar seus valores entre muitos genótipos. É necessário o desenvolvimento de métodos para comparar a condutância estomática de maneira independente das flutuações ambientais. Ainda não foi estabelecida uma relação muito clara entre a condutância estomática sob condições de irrigação sem déficit e de tolerância à seca entre os diferentes genótipos (Kholová *et al.*, 2010).

A temperatura foliar é dependente do balanço de energia. A maneira como as folhas absorvem parte da radiação presente no ambiente (ondas curtas e a maior parte das ondas longas) vem sendo utilizada como um modulador dos *status* de água na planta por meio dos estômatos (Deery *et al.*, 2016; Taiz e Zeiger, 2015). Assim, a regulação estomática é peça chave na fisiologia e está intrinsecamente ligada à fotossíntese e às relações hídricas, fornecendo informações sobre a capacidade de adaptação, sobrevivência e crescimento da planta. Os estômatos respondem ao estado da água no solo e na planta, bem como às condições meteorológicas prevalecentes no momento, além de controlarem o resfriamento por meio do processo evaporativo das folhas (Elsayed *et al.*, 2017a; Inman-Bamber e Smith, 2005).

Portanto, à medida que os estômatos se fecham em resposta à depleção de água no solo e à diminuição da absorção de água pelas raízes, a temperatura da planta aumenta. Em consequência, a transferência de energia convectiva aumenta para equilibrar a redução da transpiração (Yu *et al.*, 2015). Assim, os estômatos fechados ou parcialmente fechados influenciam a redução da absorção de CO₂ ou a regulação das trocas gasosas, permitindo que a planta se adapte rapidamente à mudança de estímulos bióticos e abióticos (Blonquist, Norman e Bugbee, 2009; Zhao *et al.*, 2017b).

A medição da diferença temperatura entre o dossel vegetativo e a temperatura do ar vem sendo usada para a determinação do nível de estresse hídrico das culturas. Essa informação é obtida por meio de uma técnica chamada de termografia por infravermelho termal, que apresenta como características fundamentais: não ser destrutiva; atuar sem contato com as plantas; e fornecer estimativas consideravelmente precisas da demanda real de água das culturas (Bijanzadeh e Emam, 2012). Essa técnica pode ser usada para medir de forma direta a temperatura do dossel vegetativo, o que permite estimativas de condutância estomática, transpiração e estresse hídrico. Tais estimativas têm sido aplicadas à programação de irrigação de culturas agrícolas e, recentemente, vem sendo usada para prever o rendimento das culturas (Çolak *et al.*, 2015; Gonzalez-Dugo, Zarco-Tejada e Fereres, 2014a; López *et al.*, 2009).

O *Crop Water Stress Index* (CWSI) foi desenvolvido por Idso *et al.* (1980) e modificado por Jackson *et al.* (1981). Baseia-se na determinação da taxa de transpiração atual de uma cultura, por meio das medições da temperatura da copa e do déficit de pressão de vapor. Seu cálculo baseia-se em três variáveis ambientais principais: temperatura da copa das plantas (T_c), temperatura do ar (T_a) e déficit de pressão atmosférica de vapor (DPV) (Bijanzadeh e Emam, 2012; Egea *et al.*, 2017; Klem *et al.*, 2018; Veysi *et al.*, 2017a). O CWSI é baseado na teoria do balanço de energia em uma superfície, em funções lineares do diferencial de temperatura entre a cultura e o ar, e no déficit de pressão de vapor, que dependem da cultura e das condições atmosféricas (López *et al.*, 2009).

Nos cenários projetados de mudança climática em vários trabalhos científicos, o suprimento insuficiente de água para a agricultura será a regra e não a exceção. O manejo da irrigação passará da ênfase na produção por unidade de área para a maximização da produção por unidade de água consumida (produtividade da água) (Fereres e Soriano, 2006; Letícia *et al.*, 2010; Molden *et al.*, 2003; Ramírez *et al.*, 2015). A produtividade da água deve ser entendida como a razão entre a produção agrícola e a quantidade de água consumida (evapotranspirada), e tem sido usada para relacionar o uso da água na agricultura. (Mendonça *et al.*, 2003; Sharma, Molden e Cook, 2015).

O aumento da produtividade da água na agricultura terá um papel vital na competição por recursos escassos, na prevenção da degradação ambiental e na provisão de segurança alimentar. O manejo baseado na produtividade de água permitirá obter todos os benefícios de outros insumos da produção, tais como fertilizantes, sementes de alta qualidade, preparo

de solo, mão-de-obra, energia e maquinário. Inclui-se nesse contexto a necessidade de disponibilizar água para sustentar os ecossistemas e atender às crescentes demandas, urbana e industrial (Molden *et al.*, 2003; Sharma, Molden e Cook, 2015).

Há potencial para melhorar a produtividade da água em muitas culturas e há informações suficientes para definir a melhor estratégia de irrigação deficitária para muitas situações (Conaty *et al.*, 2014; Kaboosi e Kaveh, 2012). Um aspecto frequentemente ignorado na gestão da água relaciona-se ao controle da perda total de água ao nível da folha, quando a água está disponível (Fereres e Soriano, 2006; Kholová *et al.*, 2010).

Contudo, apesar do milheto adaptar-se a condições de restrição hídrica severa, sabe-se que a perda de água e a tolerância à desidratação e à seca ainda não são completamente compreendidas (Kusaka, Lalusin e Fujimura, 2005). Neste sentido, este trabalho teve o objetivo de estudar os impactos do estresse abiótico sobre a produtividade da água do milheto e quantificar suas relações de trocas gasosas com a atmosfera para diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo.

1.2 Material e métodos

Ambiente experimental

O experimento foi realizado na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, (ESALQ/USP), em Piracicaba, SP (22°43’ S; 47°38’W, 546 m de altitude). As plantas de milheto (*Pennisetum glaucum* [L.] Leeke, cv. BRS1501) foram cultivadas em casa de vegetação com área total de 400 m², em vasos de concreto com capacidade de 100 dm³ e medindo 0,6 x 0,45 x 0,40 m (largura, comprimento, profundidade). Os vasos foram distribuídos com 0,5 m entre vasos e 1,0 m entre linhas.

O cultivo foi realizado em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (Typic oxisol). A semeadura foi realizada com profundidade de 1 cm. Após emergência, foi realizado desbaste para que cada parcela tivesse seis plantas, correspondendo a um estande de 10 plantas por metro linear (comumente adotado para a cultivar de milheto usada).

Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, apresentando 4 blocos e 4 níveis de reposição hídrica. O experimento foi realizado nos meses de dezembro de

2016 e janeiro de 2017. Os tratamentos foram os níveis de reposição de água, calculados com base em um tratamento testemunha, cuja umidade do solo foi mantida próximo à capacidade de campo, denominado tratamento Nivel 100% θ_{cc} . Os níveis foram estabelecidos em 40%, 70%, 100% e 130% θ_{cc} . A imposição dos níveis de reposição teve início 18 dias após a germinação das plantas.

A avaliação das plantas foi realizada no decorrer do ciclo fenológico até a fase de emborrachamento de grãos.

Os dados experimentais foram testados quanto aos pressupostos de normalidade de variâncias, com o teste de Shapiro e Wilk (1965), e de homocedasticidade, com o teste de Levene. Quando detectadas diferenças significativas entre tratamentos, a comparação de médias foi realizada com o auxílio do teste de Tukey, em nível de significância de 5%. As análises foram realizadas com o auxílio do software R (R Core Team 2018), v.3.3.4, utilizando os pacotes ExpDes.pt (Ferreira *et al.*, 2018) e ggplot2 (Wickham, 2009).

Caracterização físico-química do solo e fertilização

O solo foi fertilizado de acordo com as recomendações do Boletim 100 do Instituto Agrônomo de Campinas, para a cultura do milho no Brasil (Teixeira *et al.*, 1997). A adubação de base (macro e micronutrientes necessários) foi realizada antes do plantio e as adubações em cobertura (nitrogênio) foram aplicadas via fertirrigação, divididas em cinco (05) aplicações.

Amostras indeformadas foram coletadas para determinação da densidade global (Ds), densidade das partículas (Dp) e porosidade total (α) do solo, bem como para a obtenção das curvas características de retenção de água no solo, por meio de mesa de tensão (-1, -2, -4 e -6 kPa) e extratores de Richards (-10, -30, -50, -100, -500, -1000 e -1500 kPa) (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização física e química do solo em casa de vegetação milho.

Prof.	areia	silte	argila	Ds	Dp	α	θ_{cc}	θ_{pmp}	pH	M.O.	P	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC
	(%)			g cm ⁻³		(%)	cm ³ cm ⁻³	cm ³ cm ⁻³	-	g.dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol. dm ⁻³						
0-10 cm	75,1	7,8	17,1	1,53	2,65	42,3	0,225	0,102											
									4,9	28	105	133	1,6	32	7	<1	28	40,6	68,6
10-20 cm	74,5	8,0	17,5	15,0	2,65	43,4	0,226	0,098											
20-30 cm	74,4	8,6	17,00	1,69	2,64	36,0	0,242	0,133	5,1	22	95	100	1,3	25	6	<1	28	32,3	60,3

* As caracterizações do solo, química e física, foram realizadas de acordo com os métodos padrões adotados para solos tropicais (Raij *et al.*, 2001). Resumidamente, o pH foi determinado em solução de CaCl₂ (0,01M); P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ em resina de troca iônica; Solução de H + Al em KCl (1M); Areia, silte e Argila pelo método do

Bouyoucos Hydrometer, MO (matéria orgânica) pelo método Walkley-Black, e θ_{cc} e θ_{pmp} pelo método do extrator de Richards.

Irrigação e manejo da cultura

A irrigação foi realizada por gotejamento, com dois gotejadores por vaso, do tipo botão (PCN-CNJ) e com vazão nominal de 8 L h^{-1} , equipados com divisores de descarga para melhor distribuição da irrigação nos vasos. O manejo da irrigação foi realizado por meio do monitoramento da tensão da água no solo, utilizando baterias de tensiômetros de punção em três profundidades (0,15, 0,25 e 0,35 m). As leituras de tensão foram transformadas em potencial matricial da água no solo (ψ_m) (equação 1) e, em seguida, a estimativa da umidade foi realizada por meio do modelo proposto por Van Genuchten (1980) (equação 2). Os turnos de rega foram adotados entre um e três dias variando em função da demanda das plantas.

$$\psi_m = L_t - h_c \quad (1)$$

Em que:

ψ_m - potencial matricial da água no solo (kPa);

L_t - leitura do tensiômetro ou tensão da água no solo (kPa);

h_c - pressão equivalente à altura da coluna d'água no tensiômetro (kPa).

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

Em que:

θ (ψ_m) - umidade volumétrica em função do potencial mátrico, em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$;

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

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

m, n - parâmetros de regressão da equação, adimensionais;

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

ψ_m - potencial mátrico, em kPa.

Mensurações nas plantas

As medidas fisiológicas nas plantas foram iniciadas dez dias após a imposição dos níveis de reposição hídrica, o que correspondeu ao segundo decêndio do mês de dezembro de 2017.

As medidas do potencial de água na folha foram feitas com câmara de pressão tipo Scholander (Modelo 3005, Soil Moisture Equipment Corporation, Santa Bárbara, CA, EUA) (Scholander *et al.*, 1964). Foram feitas três avaliações de potencial de água na folha durante a aplicação dos níveis de reposição de água no solo. As medidas foram feitas na última folha totalmente expandida, em três plantas por parcela (n=6). As coletas foram feitas antes do amanhecer e as folhas escolhidas foram embrulhadas em folha de alumínio e armazenadas em local com temperatura controlada, por um período máximo de uma hora antes da amostragem.

As trocas gasosas (H₂O e CO₂), realizadas pelas plantas foram quantificadas com sistema de analisador de gases por infravermelho portátil (LI-6400XT, Li-cor, Lincoln, NE, USA). As medições de trocas gasosas foram realizadas entre 09:00 h e 12:00 h. A concentração de CO₂ no ar durante as medições foi fixada em $400 \pm 5 \mu\text{mol}^{-1}$. A umidade relativa mantida no interior da câmara ficou entre 50% e 60% e a temperatura ambiente foi a adotada. Para a determinação da densidade do fluxo de fótons fotossinteticamente ativos - DFFFA no interior da câmara, foi feita uma curva de resposta fotossintética à luz entre 0 e $2500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Imagens termais e análises

A temperatura da folha e do dossel foi obtida por meio de imagens térmicas, com câmara de infravermelho de marca Flir modelo T640, produzindo imagens térmicas com resolução de 640 x 480 pixels e sensibilidade termal de 0,035°C e faixa de temperatura de trabalho de -40°C a 2.000°C. As imagens térmicas foram tomadas em conjunto com as medidas das trocas gasosas nas folhas das plantas, a fim de observar as relações entre a temperatura foliar e as trocas de gases com o ambiente, em função dos respectivos manejos de irrigação adotados pela planta. O processamento e a análise foram realizados por meio do software Flir Tools V. 5.2.15161. As imagens zenitais foram tiradas a uma altura de aproximadamente 1,3 m da superfície de cada parcela.

Mensuração dos dados meteorológicos

O monitoramento da radiação solar global (Q_g) se deu por meio de um piranômetro de fotodiodo de silício (LI200X - Campbell Sci.). A temperatura do ar (°C) e sua umidade

relativa (%) foram obtidas com um sensor Vaissala (HMP45C - Campbell Sci.) instalado no interior da casa de vegetação, com valores médios obtidos em intervalos de coleta de 15 minutos.

CWSI - Crop Water Stress Index

O *Crop water stress index* CWSI (Idso et al., (1981) é definido com base na diferença entre a temperatura do dossel e a temperatura do ar ($T_c - T_a$) (Equação 3) .

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LBI}}{(T_c - T_a)_{LBS} - (T_c - T_a)_{LBI}} \quad (3)$$

Em que:

T_c - temperatura do dossel;

T_a - temperatura média do ar;

$(T_c - T_a)_{LBI}$ - linha base de temperatura inferior, correspondente à 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;

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

Normalmente esse índice de estresse baseado em temperatura térmica é calculado a partir de medições feitas uma vez ao dia ou durante um curto período de tempo, próximo ao meio-dia, em condições livres de nuvens. O CWSI oscila entre 0 e 1; tende 0 após as irrigações e sobe progressivamente até 1 quando a água do solo está esgotada (O'Shaughnessy *et al.*, 2012).

A determinação de $(T_c - T_a)_{LBI}$ e $(T_c - T_a)_{LBS}$ pode ser feita tanto por meio de relações teóricas ou empíricas. Como exemplos de relações teóricas, temos os relatos feitos por Jackson *et al.* (1981); Jackson, Kustas e Choudhury (1988); Agam et al. (2013b); Farías Ramírez et al. (2015); O'Shaughnessy et al., (2011); e Ghaemi et al., (2015). Quanto às relações empíricas mencionadas, citam-se os trabalhos de Idso *et al.* (1981); Irmak, Haman e Bastug, (1985); Payero, Neale e Wright, (2005); Li et al., (2010); e Agam *et al.* (2013a). Neste trabalho, optou-se pela perspectiva empírica, seguindo a metodologia de Idso *et al.* (1981).

Produtividade de biomassa

A produtividade de biomassa seca (Mg ha^{-1} de matéria seca, ou Mg ha^{-1} de MS) foi calculada para a área média de copa ocupada pelas plantas em cada unidade, devido ao efeito buquê, que leva em consideração a área tomada pelo volume da copa, de acordo com a Equação 3. As amostras foram submetidas ao processo de secagem em estufa a 65°C durante 72 horas, e pesadas para a obtenção dos valores de matéria seca.

$$PB = \frac{\left(\frac{PBP}{A}\right)}{100} \quad (3)$$

Em que: PB— Produção de biomassa (Mg ha^{-1}), PBP— Produção média de biomassa das parcelas (g); A—Área em m^2 da unidade experimental = $0,6 \times 0,9$ totalizando $0,54 \text{ m}^2$; 100 é o fator de conversão para transformar em hectare.

Produtividade da água para biomassa - PAB

Para calcular a produtividade da água para biomassa, foi necessário converter os dados de PB (kg). De posse dos dados de PB, a PAB foi calculada pela Equação 4.

$$PAB = \frac{PBP}{VT} \quad (4)$$

Em que: PBP - produtividade da água para biomassa; em kg m^{-3} ; PBP produção média de biomassa das parcelas; em kg; e VT - volume total de água aplicado na parcela, em m^3 .

Obs.: no nível de reposição hídrica 130% θ_{cc} houve drenagem, e foi considerado todo o volume de água aplicado em cada tratamento.

1.3 Resultados e discussão

Na Figura 1 (a) é mostrada a variação temporal das temperaturas máxima, média e mínima em cada fase fenológica do milheto) no decorrer do período de avaliação ocorrido no mês de dezembro de 2016 e janeiro de 2017 (a), a saber: E1 – da emergência à terceira folha visível ; E2 –quinta folha visível, (13 e 15 dias após a emergência – DAE); E3 – início da formação da panícula; E4 – folha-bandeira visível; E5 –panícula visível (53,5 DAE nas cultivares voltadas à produção de biomassa vegetativa. Na Figura 1 (b) são observadas as variações diárias no período de análise. A temperatura média no decorrer do ciclo foi de $27,7$

°C e a mínima foi de 15,9 °C. Já para as temperaturas diárias os maiores valores foram observados entre 12:00 h e 15:00 h, atingindo picos de 40°C.

Salienta-se que, em comparação com o milho e o sorgo, o milheto requer mais calor para germinar e estabelecer-se de maneira uniforme (Muchow, 1989). As condições ideais para o milheto são de temperaturas noturnas de 15 a 28 °C. Estudos realizados com milheto na Índia, em período similar ao do presente trabalho, mostram que há incrementos significativos na produção de biomassa em temperaturas elevadas (Medina, Gupta e Vadez, 2017; Nelson *et al.*, 2018b).

Figura 1. Mudanças de temperatura do ar no interior da casa de vegetação no decorrer do período experimental (dias após o plantio – DAP) nas respectivas fases fenológicas da cultura E1 - Três folhas, E2 - Cinco folhas, E3 - Iniciação da Panícula, E4 - Estádio de Emborrachamento, E5 - Fase de Enchimento de Grão (a) Temperaturas máxima – (Max), média – (Med) e mínima – (Min). Flutuação horária diária da temperatura (b) – média das fases fenológicas (linha vermelha) e os valores medidos (°C).

Pode-se observar, na curva de luz do milheto [Figura 2 (a)], que não houve saturação luminosa na resposta de assimilação de CO₂ da cultura (planta C4) nas condições de luz reinantes durante o experimento. Em baixa luminosidade, a taxa de assimilação de CO₂ é determinada pelas características de luz e pela exigência de energia entre o mesófilo e o cloroplasto da bainha do feixe. Em alta taxa de irradiação, o CO₂ assimilado é provavelmente limitado pela capacidade de transporte de elétrons, mas também pode ser limitado pela capacidade de regeneração de fosfoenolpiruvato carboxilase - PEP ou ribulose difosfato - RuBP ou atividade de Rubisco (Caemmerer, von e Furbank, 2016).

Figura 2. Curva de resposta da taxa de assimilação de $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ – A (a) e transpiração - E $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em resposta a variação da densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos – DFFFA para a condição de manejo de irrigação de 100% θ_{cc} (b). Teste de médias para assimilação de CO₂ seguidos pela mesma letra não diferem em 5% probabilidade pelo teste de Tukey (c).

Ressalta-se que mesmo havendo aumento na taxa de transpiração com o incremento da irradiação, não houve aumento na assimilação de CO₂ como pode ser observado na Figura 2 (b). Observando-se a Figura 2 (c), as maiores taxas de assimilação de CO₂ ocorreram nos níveis de irradiação entre 1500 e 2500 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, com taxa máxima de assimilação na ordem de 33 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Esses resultados foram submetidos à análise de variância (teste F) e ao teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Não foram observadas diferenças significativas, ou seja, nas condições ambientais do estudo, a taxa máxima de assimilação ocorre aos 1500 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Isto significa que incrementos naturais ou artificiais de irradiação não implicariam em incrementos significativos na taxa de assimilação de CO₂.

Esta resposta está relacionada diretamente às limitações estomáticas e bioquímicas que contribuem para as restrições na difusão de CO_2 nas folhas, através dos estômatos, tornando-se uma limitação significativa ao ganho de carbono pela planta (Nelson *et al.*, 2018a). Assim, o estômato apresenta duas funções principais: (1) manter o estado da água das folhas durante a fotossíntese, limitando as taxas de transpiração excessiva (Taiz e Zeiger, 2015); (2) agir como válvula de emergência, com fechamento em resposta ao déficit hídrico para manter as folhas hidratadas. Em condições de alta demanda atmosférica de água por unidade de carbono absorvido pela planta, tal como em ambientes secos, os estômatos frequentemente operam com abertura reduzida, o que diminui o influxo de CO_2 e aumenta a limitação potencial dos estômatos na fotossíntese (Sage, Peixoto e Sage, 2013).

A intensidade da irradiação (ou de luz) é o fator ambiental chave para a fotossíntese (Osroosh *et al.*, 2015). Assim, a resposta da fotossíntese foliar (A) à assimilação de CO_2 tem sido foco de vários estudos, a fim de identificar os níveis de irradiação ótimos para a fotossíntese foliar (Çolak *et al.*, 2015; Inoue *et al.*, 1990; Maes *et al.*, 2011). A resposta da fotossíntese à luz é diretamente proporcional e linear à assimilação de CO_2 até uma taxa máxima de fotossíntese, a partir da qual a oferta de CO_2 torna-se limitante (BLACKMAN, 1905). Esse é o ponto de eficiência máxima de conversão da luz em energia química pela fotossíntese, ou seja, CO_2 assimilado por quantum de luz absorvida (Taiz e Zeiger, 2015).

Sabe-se que o ponto de eficiência máxima é semelhante em uma vasta gama de espécies, quando expresso com base na luz absorvida (Ogren, 1993), e não depende da irradiância ou do conteúdo de nitrogênio foliar por unidade de área foliar (CANNELL e THORNLEY, 1998). As duas partes da curva de resposta à luz da fotossíntese são descritas como limitadas por luz e CO_2 , respectivamente.

Na Figura 3 é mostrado o manejo da irrigação ao longo do período experimental, tendo como base a umidade volumétrica do solo para o tratamento Nível 100% θ_{cc} . A área sombreada em verde foi um período em que não houve imposição de irrigação com déficit, pois até o décimo quinto DAP todas as plantas receberam a mesma quantidade de água. As linhas tracejadas representam o nível de umidade do solo com base em volume ($\theta \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), e as linhas cheias, azul e vermelha, indicam o valor da umidade do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, respectivamente. Após o trigésimo dia as demandas de água pelas plantas aumentaram, em virtude do aumento da área foliar e do crescimento da planta, chegando nesse período a 29% de redução. A umidade observada na

reposição de 100% θ_{cc} apresentou essa variação em função do consumo hídrico pelas plantas, associado à evaporação de água do solo.

Figura 3. Média do conteúdo de água no solo (θ) para o tratamento 100% da θ_{cc} nas camadas 0,20 m, 0,40 m e 0,60 m durante a época de irrigação (dezembro e janeiro), - ponto de murcha permanente – PMP; o sombreamento verde indica o período sem imposição de estresse hídrico, dias após o plantio – DAP.

Nos tratamentos em que o milho esteve sob estresse hídrico houve redução na taxa de assimilação de CO_2 . Paralelamente, houve reduções na condutância estomática e nas taxas de transpiração, que podem ser observadas na Figura 4(a). A taxa de assimilação de CO_2 observada no tratamento 100% θ_{cc} foi de $39,2 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; nos níveis 130% θ_{cc} , 70% θ_{cc} e 40% θ_{cc} , as taxas de assimilação foram de 35,2; 21,7 e $14,7 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente (Figura 4c). Todos os tratamentos apresentaram reduções significativas na troca gasosa, comparados ao tratamento 100% θ_{cc} . A redução percentual na taxa de assimilação de CO_2 entre os tratamentos 100% θ_{cc} e 40% θ_{cc} foi de 62,45%. No tratamento 130% θ_{cc} essa redução foi em torno de 10%, indicando que a água é o fator mais importante para o desenvolvimento das plantas. Seu excesso acarreta sérios prejuízos, podendo afetar a aeração na zona radicular e a lixiviação dos nutrientes; e sua falta pode inibir o crescimento e afetar o metabolismo fisiológico (Taiz e Zeiger, 2015).

Na condutância estomática (Figura 4b), o maior valor observado foi de $0,366 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ no tratamento 100% θ_{cc} . Comparando com os valores médios encontrados no tratamento 40% θ_{cc} , a redução foi chegou a 82,3%. Já para a taxa de transpiração (Figura 4c), o maior valor observado foi $5,18 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, no tratamento de 100% θ_{cc} , e o menor valor foi de $1,81 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, no tratamento 40% θ_{cc} , com uma redução de 78,3%.

Figura 4. Resposta da assimilação de CO_2 (A), condutância estomática (g_s) $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e transpiração (E) $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para os níveis de reposição hídrica de 40, 70, 100 e 130% da umidade θ_{cc} . Médias seguidas pela mesma letra não diferem em 5% probabilidade pelo teste de Tukey; CV coeficiente de variação.

Sob estresse hídrico, as plantas mantêm seus estômatos parcial ou totalmente fechados, como forma de minimizar a perda de água e manter o turgor foliar, uma característica importante para a tolerância à seca (Lawlor e Tezara, 2009). Respostas semelhantes foram encontradas em cultivos de sorgo e milho em período de déficit hídrico no solo, durante o desenvolvimento vegetativo (Kakani *et al.*, 2011), bem como em *Panicum virgatum*, *Setaria italica* e *Bothriochloa ischaemum*), plantas C4 referidas como espécies de poáceas introduzidas, tradicionais na região do vale de Loess, na China (XU *et al.*, 2006).

Como a fotossíntese e a transpiração são influenciadas conjuntamente pela condutância estomática, a ocorrência de baixos valores de condutância estomática - g_s podem afetar adversamente o crescimento da cultura devido a fotossíntese (Begum *et al.*, 2012; Egea *et al.*, 2017; Wang e Gartung, 2010). Para que o crescimento das plantas continue, as plantas precisam assimilar CO_2 suficiente, otimizando a transpiração e a fotossíntese. Isto

requer a regulação de g_s pelas plantas (Inman-Bamber e Smith, 2005). Ressalta-se que esses são mecanismos de alta complexidade; devido à relação entre a transpiração e a condutância estomática, a transpiração das folhas individuais pode depender da temperatura foliar, mas pode haver substancial variabilidade espacial de transpiração decorrente posição da folha dentro do dossel da cultura, devido à variabilidade espacial de g_s (Bonnett, Hewitt e Glassop, 2006; Castro-Nava *et al.*, 2016; Egea *et al.*, 2017; Jones, 1999).

A perda de água das plantas deve ser minimizada com o baixo potencial hídrico do solo (Taiz e Zeiger, 2015). A produção de biomassa depende principalmente da capacidade de manter, simultaneamente, alta fotossíntese líquida e baixa transpiração. Nessa tensão, a produção de biomassa deve ser vista em dependência com as trocas de gases CO_2 / H_2O , que pode ser estimada pela eficiência do uso da água da fotossíntese (Marchiori, Machado e Ribeiro, 2014). Assim, um ponto crítico para a fisiologia das plantas é atingido quando a fixação de CO_2 (fotossíntese aparente) cai abaixo da produção de CO_2 (ponto de compensação) (Burman *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2017a).

Provavelmente as reduções nas trocas gasosas são oriundas da desidratação celular, que afetam negativamente os processos fisiológicos básicos, como a redução do turgor. Essas reduções estão associadas à desidratação e ao potencial hídrico do aploplasto, que vai se tornando mais negativo que o do simplasto. Como consequência secundária dessa desidratação, aumenta a concentração dos íons dentro da célula, o que pode torná-los citotóxicos (Taiz e Zeiger, 2015). O mesmo comportamento é observado na taxa transpiratória, cujo declínio é inversamente proporcional à umidade do solo quando a taxa de transpiração potencial aumenta devido ao aumento do déficit de pressão de vapor - VPD. Como o declínio na taxa de transpiração real resulta em uma perda de turgescência, o teor de umidade do solo no qual ocorre o murchamento foliar é variável em condição de campo, sendo diretamente proporcional à taxa de transpiração potencial (Conaty *et al.*, 2014).

A imagem térmica mostra diferenças entre plantas irrigadas e não irrigadas, e também entre diferentes intensidades de irrigação, tal como relatam diversos estudos (Bahmani, Sabziparvar e Khosravi, 2016; Egea *et al.*, 2017; García-Tejero *et al.*, 2018a; Pou *et al.*, 2014; Veysi *et al.*, 2017b). Em diversos cenários, uma única imagem térmica é suficiente para revelar a variação espacial no estado da água na planta. Em macroescala, a geração de imagens térmicas em sensoriamento remoto é uma ferramenta de alto potencial para

detectar a variação espacial do estado da água presente no dossel da cultura (Berni *et al.*, 2009).

Nas Figuras 5 a, b, c, d observam-se as imagens térmicas para os diferentes níveis de reposição de hídrica de água no solo (tratamentos), 130% (a), 100% (b), 70% (c), 40% (d) da umidade com base na θ_{cc} . Nas Figuras 5 (e, f) nota-se a relação da assimilação de CO_2 em função da temperatura e da variação entre a temperatura do dossel da cultura e a do ar ($T_c - T_a$), respectivamente, sob as condições de manejo de irrigação.

Figura 5. Imagens térmicas (quanto mais escura a cor da folha, menor a temperatura) para os níveis de reposição hídrica de 130% (a), 100% (b), 70% (c), 40% (d) e relação entre a taxa de assimilação $A - \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e a temperatura foliar (e) e a diferença entre a temperatura da folha e a temperatura do ar ($T_c - T_a$) em (f) obtidas por meio de imagens térmicas em diferentes níveis de reposição hídrica, AIC – Critério de Informação de Akaike e BIC – Critério de Informação Bayesiano e P – valor - probabilidade de significância, área sombreada é o intervalo de confiança para 95% das observações.

As relações mostradas entre fotossíntese e a temperatura foliar foram significativas ($R^2=0,73$). O mesmo comportamento foi observado na relação entre fotossíntese e ($T_c - T_a$). Resultados semelhantes foram observados em cultivos de citros no sudeste da Espanha (García-Tejero *et al.*, 2011); citros em Sevilha Espanha (Gonzalez-Dugo, Zarco-Tejada e Fereres, 2014b); trigo no Egito (Elsayed *et al.*, 2017b); e mamão (*Carica papaya*) no Estado do Rio de Janeiro Brasil (Lima *et al.*, 2016a).

O uso da termografia na detecção do estado da água da cultura depende da resposta estomática da planta no balanço de energia entre planta e atmosfera, e também da espécie estudada (Costa, Grant e Chaves, 2013; Nelson *et al.*, 2018a). Há espécies com comportamento anisódrico (perdas de água acentuadas nos tecidos vegetais) ou isohídrico, que são plantas que fecham seus estômatos em resposta à redução da umidade do solo ou ao aumento no déficit de pressão de vapor. Tais plantas controlam seu potencial hídrico, como é o caso do milheto, do sorgo, do milho e do álamo, entre outros (Thomson *et al.*, 2012). Essas respostas das plantas à variação entre ($T_c - T_a$) são mais evidenciadas em condições de ambientes quentes e secos; no entanto, as diferenças também podem ser observadas em condições de umidade relativamente alta e temperatura baixa. (Maes e Steppe, 2012).

O potencial de água na folha Ψ_{folha} é uma medida indireta da resposta fisiológica da planta às reposições de água no solo. Portanto, é importante determinar se Ψ_{folha} reflete as respostas fisiológicas diretas das plantas, como as trocas gasosas (Conaty *et al.*, 2014). A correlação entre fotossíntese e Ψ_{folha} foi significativa ($R^2=0.66$, $p<0,001$), conforme mostrado na Figura 6 (a). A tendência é de redução da fotossíntese à medida que Ψ_{folha} se torna mais negativo. Para a relação entre fotossíntese e produtividade de biomassa, a correlação foi linear e positiva ($R^2=0.79$, $p<0,001$) tal qual mostrado na Figura 6 (b).

Figura 6. Relação entre a taxa de assimilação (A) - $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ com o potencial de água na folha - Ψ (Mpa) (a); assimilação com produtividade em - kg obtidos no experimento (b).

A relação entre a produtividade de biomassa (kg) e a temperatura foliar observada durante o período experimental é apresentada na Figura 7 (a). Houve correlação significativa, linear e negativa entre produtividade e reposição de água no solo ($R^2=0.72$, $p<0,001$). A produtividade com Ψ_{folha} apresentou resposta similar à observada com a temperatura, tendo

correlação significativa ($R^2=0.85$, $p<0,001$), na qual a produtividade tende a diminuir à medida que Ψ_{folha} se torna mais negativo (Figura 7 b).

Figura 7. Relação entre produtividade e temperatura foliar do período vegetativo (a); produtividade em kg por unidade experimental e potencial de água na folha (b); uso da água com CWSI (c); produtividade com CWSI.

Resultados similares foram encontrados em sete cultivares de milho, nos quais Ψ_{folha} diminuiu sob condições de seca, quando comparado às condições reinantes com irrigação suplementar (Kusaka, Lalusin e Fujimura, 2005). A diminuição de Ψ_{folha} induzida pelo déficit de reposição hídrica pode estar relacionada à redução no número de estômatos ou à redução da área foliar e ao consequente menor consumo total de água pela planta (Toscano *et al.*, 2018).

Durante seu ciclo de vida as plantas são frequentemente submetidas a períodos de déficit hídrico do solo e da atmosfera (Pessarakli, 2005). As principais consequências do estresse hídrico são reduções do crescimento das plantas e da fotossíntese. Inicialmente, o estresse hídrico reduz a expansão foliar, aumenta o fechamento estomático, a disponibilidade de água nos tecidos das folhas e a taxa de assimilação de CO_2 . Consequentemente, causa alterações estruturais nos cloroplastos, afeta o transporte de elétrons e as reações de assimilação de CO_2 , o que prejudica a síntese de ATP (Bahmani, Sabziparvar e Khosravi, 2016; Pessarakli, 2005; Steduto *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2017).

O Índice de estresse hídrico da cultura (CWSI) como ferramenta de gestão e suas relações com cultura

A resposta fisiológica das culturas aos tratamentos de irrigação e as relações entre as variáveis de fotossíntese ($A - \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), transpiração ($E \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e

condutância estomática (g_s mol H_2O $m^{-2} s^{-1}$) e os índice de estresse hídrico calculados a partir de imagens térmicas (CWSI) são apresentadas na Figura 8 (a, b, c).

Houve correlações significativas ($p < 0,01$), considerando os tratamentos estudados nos níveis de reposição hídrica, o índice de estresse hídrico da cultura CWSI correlacionado com a fotossíntese - A ($R^2 = 0,61$); condutância estomática - g_s ($R^2 = 0,47$); e transpiração - E ($R^2 = 0,42$). Os critérios de informação de Akaike que são medidas relativas da qualidade de ajuste de um modelo estatístico estimado (AIC) e Bayesiano (BIC), foi critério de avaliação de modelos definidos em termos da probabilidade a posteriori, sendo assim chamado porque Schwarz deu um argumento Bayesiano para prová-lo. Para o modelo linear no qual apresentaram o melhor ajuste com valores de (CWSI vs A, g_s e E respectivamente Figura 8 a, b, c) no critério de AIC são: 110,2; -26,29; 71,73 já os critérios de BIC encontrados são: 112,5-23,97; 74,04.

Figura 8. Relação entre a taxa de assimilação (A) - $\mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ (a); condutância estomática (g_s) mol $H_2O m^{-2} s^{-1}$ (b) e transpiração (E) mmol $H_2O m^{-2} s^{-1}$ (b) (c), com Índice de estresse hídrico da cultura CWSI. A área sombreada é o intervalo de confiança para 95% das observações.

Neste estudo, os níveis de reposição de água no solo foram usados como base para observar as relações entre trocas gasosas e o CWSI. Os resultados mostraram que o CWSI é inversamente proporcional a A, g_s e E. Resultados semelhantes foram observados em

gergelim sob estresse hídrico na região de Najaf Abad, no Iran (Yousefzadeh Najafabadi e Ehsanzadeh, 2017); em sésamo *Sesamum indicum* (Boureima *et al.*, 2012); e em videiras (Pou *et al.*, 2014).

As informações provenientes das imagens térmicas do dossel da cultura mostram uma diferença clara entre os níveis de reposição de água nas plantas. As plantas submetidas ao tratamento 100% θ_{cc} apresentaram menores valores de CWSI, em comparação àquelas submetidas ao tratamento 40% θ_{cc} . Tal como em estudos anteriores, o CWSI aumenta com a intensidade do estresse hídrico. Assim, imagens térmicas podem ser usadas para a detecção espacial precoce do estresse hídrico, bem como para a quantificação desse estresse em diversas culturas agrícolas (Crop e Stress, 1982; García-Tejero *et al.*, 2018b; Lima *et al.*, 2016b).

Deve-se salientar que o aumento dos valores de CWSI representa indiretamente a resposta de assimilação de CO_2 , bem como a transpiração e a condutância estomática, tal como se pode observar na Figura 8. Fatores ambientais como o estresse hídrico podem acarretar nos seguintes efeitos nas plantas: redução no potencial hídrico, desidratação celular e resistências hidráulicas, redução de atividades metabólicas, alterações na partição do carbono, inibição da fotossíntese, desidratação de membranas e proteínas, fechamento estomático e redução da expansão celular (Taiz e Zeiger, 2015). O CWSI é um índice de estresse robusto, do ponto de vista físico e biológico, devido às respostas fisiológicas apresentadas pela cultura com a variação deste índice (Ćosić *et al.*, 2018; Klem *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2017).

Na Figura 9 (a e b) são apresentadas as relações entre o uso da água em (mm) e o CWSI ($R^2=0.64$, $p<0,001$), e entre a produtividade da biomassa e o CWSI ($R^2=0.58$, $p<0,001$). No que diz respeito à produtividade da água em termos de biomassa [PAB, Figura 9 (c)], observa-se uma relação linear e positiva com o CWSI ($R^2=0.65$, $p<0,001$). Plantas com menor reposição hídrica foram mais eficientes no uso da água. Resultados semelhantes foram observados em estudos com algodão e soja irrigados em Bushland, Texas (O'Shaughnessy *et al.*, 2011), e em cultivos realizados no oeste da Turquia (Dağdelen *et al.*, 2009). Salienta-se que, mesmo apresentando maior PAB nos tratamentos com menor nível de reposição hídrica, as produções de biomassa sob tais condições foram as menores observadas, mostrando que o milho tem tolerância ao déficit hídrico, mas sofre prejuízos significativos. Estudos de viabilidade econômica são necessários para determinar o nível ótimo econômico de reposição

hídrica para produção de biomassa e otimização do uso da água (irrigação sob déficit com maior retorno financeiro).

Figura 9. Relações entre uso da água no ciclo da cultura e o CWSI (a); produtividade (kg) e CWSI (b); produtividade da água para produção de biomassa (kg m⁻³) com CWSI (c)

Os valores de CWSI obtidos neste experimento mostram tendências significativamente negativas com a produtividade de biomassa, bem como com o uso da água, refletindo bem a diminuição do rendimento causada pelo aumento do estresse hídrico da cultura. À medida que a lâmina de irrigação aplicada diminuiu, também houve reduções nas taxas de transpiração, condutância estomática e fotossíntese da cultura (Figura 4). Isto resultou no aumento da temperatura do dossel da colheita que, por sua vez, influencia significativamente a produtividade [Figura 9(c)] e causa subsequentes reduções na produtividade de biomassa. Esses resultados corroboram com estudos similares (Ballester *et al.*, 2013; Čosić *et al.*, 2018; García-Tejero *et al.*, 2017; Klem *et al.*, 2018; O'Shaughnessy *et al.*, 2011; Sezen *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2017).

Ressalta-se que o estresse hídrico não tem o mesmo efeito em todas as fases do ciclo fenológico da cultura. Os valores de CWSI na média temporal da fase vegetativa inicial de uma cultura podem estar menos relacionados ao rendimento, porque a produtividade de muitas culturas é mais influenciada pelo estresse hídrico durante a antese e os estágios subsequentes de produção. (Kaboosi e Kaveh, 2012; Steduto *et al.*, 2012).

O índice CWSI descrito neste trabalho é uma indicação útil do momento ideal de iniciar a irrigação. Em virtude da relação entre produtividade de biomassa e CWSI, esse índice também pode ser utilizado como ferramenta para estimar a produtividade futura da cultura do milho.

Pela impossibilidade de calcular diretamente a lâmina d'água de irrigação pelo índice CWSI, esta ferramenta deve ser complementada com medições de umidade do solo ou estimativas de evapotranspiração, a fim de implementar um sistema robusto de suporte a decisões de irrigação. O potencial de uso do CWSI na detecção da variabilidade espacial do estresse hídrico melhora o gerenciamento da irrigação e permite ajustar as profundidades estimadas do sistema radicular das plantas, assim como ajustar os valores de CAD (Capacidade de Água Disponível no solo) utilizados nas metodologias de cálculo do balanço hídrico, para fins de quantificação da lâmina de irrigação a ser aplicada.

1.4 Conclusões

Os níveis ótimos de irradiação para a fotossíntese foliar obtidos neste trabalho foram superiores a $1500 \mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com taxa máxima de assimilação na ordem de $33 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

O milho sob estresse hídrico apresentou redução na taxa de assimilação de CO_2 . Paralelamente, houve reduções na condutância estomática e na taxa de transpiração.

A diminuição do potencial hídrico foliar induzida pelos tratamentos de irrigação sob déficit foi acompanhada de redução nas taxas de fotossíntese e perdas na produtividade de biomassa.

Apesar de o milho ser uma cultura de origem tropical, aumentos na temperatura do ar resultaram em redução da produtividade de biomassa.

Embora tenha sido concebido como índice de estresse hídrico, o Crop Water Stress Index (CWSI) tem uma boa relação com os parâmetros fisiológicos do milho e com a produtividade da água em biomassa. Este índice é uma importante ferramenta para a gestão

da água, podendo ser utilizado para o monitoramento da irrigação e auxiliar na otimização econômica da produtividade da cultura do milho.

Em baixos níveis de reposição hídrica, os mecanismos de tolerância ao déficit hídrico do milho geram altos valores de produtividade da água, mas menores valores de produção de biomassa, indicando que esta cultura pode ser manejada em determinados níveis intermediários de déficit hídrico, definidos por otimização econômica.

Agradecimentos

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processes nº 2012/50083-7 and USP - ETH-FAPESP:30761), pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

Referências

- AGAM, N. *et al.* How sensitive is the CWSI to changes in solar radiation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 17, p. 6109–6120, set. 2013.
- BAHMANI, O.; SABZIPARVAR, A. A.; KHOSRAVI, R. Evaluation of yield, quality and crop water stress index of sugar beet under different irrigation regimes. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 17, n. 2, p. 571–578, 2016.
- BALLESTER, C. *et al.* Usefulness of thermography for plant water stress detection in citrus and persimmon trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 168, p. 120–129, 15 jan. 2013.
- BEGUM, M. K. *et al.* Effect of Water Stress on Physiological Characters and Juice Quality of Sugarcane. **Sugar Tech**, v. 14, n. 2, p. 161–167, 2012.
- BERNI, J. *et al.* Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring From an Unmanned Aerial Vehicle. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 3, p. 722–738, mar. 2009.
- BIJANZADEH, E.; EMAM, Y. Evaluation of Crop Water Stress Index, Canopy Temperature and Grain Yield of Five Iranian Wheat Cultivars Under Late Season Drought Stress. **Journal of Plant Physiology and Breeding**, v. 2, n. 1, p. 23–33, 2012.
- (BLACKMAN; SC, 1905)BLACKMAN, F. F.; SC, D. **Optima and Limiting Factors. With two Diagrams in the Text.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://academic.oup.com/aob/article-abstract/os-19/2/281/156306>>. Acesso em: 14 jul. 2019.
- BLONQUIST, J. M.; NORMAN, J. M.; BUGBEE, B. Automated measurement of canopy stomatal conductance based on infrared temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 12, p. 2183–2197, 2009.

BONNETT, G. D.; HEWITT, M. L.; GLASSOP, D. Effects of high temperature on the growth and composition of sugarcane internodes. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 57, n. 10, p. 1087, 18 out. 2006.

BOUREIMA, S. *et al.* Screening for drought tolerance in mutant germplasm of sesame (*Sesamum indicum*) probing by chlorophyll a fluorescence. **Environmental and Experimental Botany**, v. 81, p. 37–43, 1 set. 2012.

BRUNKEN, J.; WET, J. M. J. DE; HARLAN, J. R. The Morphology and Domestication of Pearl Millet. **Economic Botany**, v. 31, p. 163–174, 1977.

BURMAN, U. *et al.* EFFECT OF TERMINAL WATER STRESS ON GROWTH, PLANT WATER STATUS AND YIELD OF PEARL MILLET GENOTYPES. **Indian J. Plant Physiol**, v. 16, n. 3, p. 276–284, 2011.

CAEMMERER, S. VON; FURBANK, R. T. **Strategies for improving C₄ photosynthesis** *Current Opinion in Plant Biology* Elsevier Current Trends, , 1 jun. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369526616300607>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

CANNELL, M.; THORNLEY, J. H. M. Temperature and CO₂ Responses of Leaf and Canopy Photosynthesis: a Clarification using the Non-rectangular Hyperbola Model of Photosynthesis. **Annals of Botany**, v. 82, n. 6, p. 883–892, 1 dez. 1998.

CASTRO-NAVA, S. *et al.* Leaf Growth and Canopy Development of Three Sugarcane Genotypes under High Temperature Rainfed Conditions in Northeastern Mexico. **International Journal of Agronomy**, v. 2016, p. 1–7, 23 ago. 2016.

ÇOLAK, Y. B. *et al.* Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for Eggplant under Varying Irrigation Regimes Using Surface and Subsurface Drip Systems. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 4, p. 372–382, 2015.

CONATY, W. C. *et al.* Vapour pressure deficit aids the interpretation of cotton canopy temperature response to water deficit. **Functional Plant Biology**, v. 41, n. 5, p. 535, 6 maio 2014.

ĆOSIĆ, M. *et al.* Effects of irrigation regime and application of kaolin on canopy temperatures of sweet pepper and tomato. **Scientia Horticulturae**, v. 238, p. 23–31, 19 ago. 2018.

COSTA, J. M.; GRANT, O. M.; CHAVES, M. M. Thermography to explore plant–environment interactions. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 13, p. 3937–3949, 1 out. 2013.

CROP, T.; STRESS, W. Thermal Crop Water Stress Indices. **Stress: The International Journal on the Biology of Stress**, p. 1–12, 1982.

DAĞDELEN, N. *et al.* Different drip irrigation regimes affect cotton yield, water use efficiency and fiber quality in western Turkey. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 1, p. 111–120, 1 jan. 2009.

DEERY, D. M. *et al.* Methodology for High-Throughput Field Phenotyping of Canopy Temperature Using Airborne Thermography. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 1808, 2016.

DIAS-MARTINS, A. M. *et al.* Potential use of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: Food security, processing, health benefits and nutritional products. **Food Research International**, v. 109, p. 175–186, 1 jul. 2018.

EGEA, G. *et al.* Assessing a crop water stress index derived from aerial thermal imaging and infrared thermometry in super-high density olive orchards. **Agricultural Water Management**, v. 187, p. 210–221, 2017.

ELSAIED, S. *et al.* Thermal imaging and passive reflectance sensing to estimate the water status and grain yield of wheat under different irrigation regimes. **Agricultural Water Management**, v. 189, p. 98–110, 2017a.

____. Thermal imaging and passive reflectance sensing to estimate the water status and grain yield of wheat under different irrigation regimes. **Agricultural Water Management**, v. 189, p. 98–110, 2017b.

ENDRES, L. *et al.* Photosynthesis and Water Relations in Brazilian Sugarcane. **The Open Agriculture Journal**, v. 4, n. 1, p. 31–37, out. 2010.

FAOSTAT. **Data - dataset - Crops, National Production**.

FARÍAS RAMÍREZ, A. J. *et al.* Determinação do índice de estresse hídrico para a cultura do tomate cereja (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*.) utilizando termômetro infravermelho. **Anais do III Inovagri International Meeting**, p. 238–247, 2015.

FERERES, E.; SORIANO, M. A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 2, p. 147–159, nov. 2006.

FISCHER, H. W.; REDDY, N. L. N.; RAO, M. L. S. Can more drought resistant crops promote more climate secure agriculture? Prospects and challenges of millet cultivation in Ananthapur, Andhra Pradesh. **World Development Perspectives**, v. 2, p. 5–10, 1 jun. 2016.

FITA, A. *et al.* Breeding and Domesticating Crops Adapted to Drought and Salinity: A New Paradigm for Increasing Food Production. **Frontiers in plant science**, v. 6, p. 978, 2015.

GARCÍA-TEJERO, I. F. *et al.* Linking canopy temperature and trunk diameter fluctuations with other physiological water status tools for water stress management in citrus orchards. **Functional Plant Biology**, v. 38, n. 2, p. 106–117, 2011.

GARCÍA-TEJERO, I. F. *et al.* Assessing plant water status in a hedgerow olive orchard from thermography at plant level. **Agricultural Water Management**, v. 188, p. 50–60, 1 jul. 2017.

____. Thermal imaging to monitor the crop-water status in almonds by using the non-water stress baselines. **Scientia Horticulturae**, v. 238, p. 91–97, ago. 2018a.

____. Thermal imaging to monitor the crop-water status in almonds by using the non-water stress baselines. **Scientia Horticulturae**, v. 238, p. 91–97, ago. 2018b.

GENUCHTEN, M. T. VAN. **A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils** *Soil Science Society of America Journal*, 1980. Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/44/5/SS0440050892>>

GHAEMI, A. *et al.* Determining cws_i to estimate eggplant evapotranspiration and. v. 34, p. 49–60, 2015.

GHANNOUM, O. C4 photosynthesis and water stress. **Annals of botany**, v. 103, n. 4, p. 635–44, fev. 2009.

GONZALEZ-DUGO, V.; ZARCO-TEJADA, P. J.; FERERES, E. Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 198–199, p. 94–104, nov. 2014a.

____. Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 198–199, p. 94–104, 1 nov. 2014b.

IDSO, S. B. *et al.* A generalization of the stress-degree-day concept of yield prediction to accommodate a diversity of crops. **Agricultural Meteorology**, v. 21, n. 3, p. 205–211, 1980.

____. Normalizing the stress-degree-day parameter froenvironmental variability. **Agricultural Meteorology**, v. 24, p. 45–55, 1981.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2, p. 185–202, 2005.

INOUE, Y. *et al.* REMOTE ESTIMATION OF LEAF TRANSPIRATION RATE AND STOMATAL RESISTANCE BASED ON INFRARED THERMOMETRY. **Elsevier Science Publishers B.V.**, v. 51, p. 21–33, 1990.

IRMAK, S.; HAMAN, D. Z.; BASTUG, R. Determination of Crop Water Stress Index for Irrigation Timing. **Agronomy Journal**, v. 92, p. 1221–1227, 1985.

JACKSON, R. D. *et al.* Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water Resources Research**, v. 17, n. 4, p. 1133–1138, 1981.

JACKSON, R. D.; KUSTAS, W. P.; CHOUDHURY, B. J. A reexamination of the crop water stress index. **Irrigation Science**, v. 9, n. 4, p. 309–317, 1988.

JONES, H. G. Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. **Plant, Cell and Environment**, v. 22, n. 9, p. 1043–1055, 1999.

KABOOSI, K.; KAVEH, F. Sensitivity analysis of FAO 33 crop water production function. **Irrigation Science**, v. 30, n. 2, p. 89–100, 2012.

KAKANI, V. G. *et al.* Leaf photosynthesis and carbohydrates of CO₂-enriched maize and grain sorghum exposed to a short period of soil water deficit during vegetative development. **Journal of Plant Physiology**, v. 168, n. 18, p. 2169–2176, 15 dez. 2011.

KHOLOVÁ, J. *et al.* Constitutive water-conserving mechanisms are correlated with the terminal drought tolerance of pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.]. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 2, p. 369–377, 1 jan. 2010.

KLEM, K. *et al.* Interactive effects of water deficit and nitrogen nutrition on winter wheat. Remote sensing methods for their detection. **Agricultural Water Management**, v. 210, p. 171–184, 30 nov. 2018.

KUSAKA, M.; LALUSIN, A. G.; FUJIMURA, T. The maintenance of growth and turgor in pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] Leeke) cultivars with different root structures and osmo-regulation under drought stress. **Plant Science**, v. 168, n. 1, p. 1–14, 1 jan. 2005.

LAWLOR, D. W.; TEZARA, W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. **Annals of botany**, v. 103, n. 4, p. 561–79, fev. 2009.

LETÍCIA, D. *et al.* Estresse hídrico com diferentes osmóticos em sementes de feijão e expressão diferencial de proteínas durante a germinação. **Acta Scientiarum. Agronomy Maringá**, v. 32, n. 3, p. 491–499, 2010.

LI, L. *et al.* Evaluating the Crop Water Stress Index and its correlation with latent heat and CO₂ fluxes over winter wheat and maize in the North China plain. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 8, p. 1146–1155, 2010.

LIMA, R. S. N. *et al.* Linking thermal imaging to physiological indicators in *Carica papaya* L. under different watering regimes. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 148–157, 2016a.

_____. Linking thermal imaging to physiological indicators in *Carica papaya* L. under different watering regimes. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 148–157, 2016b.

LÓPEZ, L. *et al.* Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. **Agricultura Técnica en México**, v. 35, n. 1, p. 92–106, 2009.

MAES, W. H. *et al.* Monitoring stomatal conductance of *Jatropha curcas* seedlings under different levels of water shortage with infrared thermography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 5, p. 554–564, 2011.

MAES, W. H.; STEPPE, K. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 13,

p. 4671–4712, 1 ago. 2012.

MARTÍNEZ-ROMERO, A. *et al.* Agricultural Water Management Real farm management depending on the available volume of irrigation water (part II): Analysis of crop parameters and harvest quality. **Agricultural Water Management**, v. 192, p. 58–70, 2017.

MEDINA, S.; GUPTA, S. K.; VADEZ, V. Transpiration Response and Growth in Pearl Millet Parental Lines and Hybrids Bred for Contrasting Rainfall Environments. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 1846, 2017.

MENDONÇA, J. C. *et al.* Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003..

MOLDEN, D. *et al.* A Water-productivity Framework for Understanding and Action. *In*: KIJNE, J. W.; BARKER, R.; MOLDEN, D. (Eds.). . **Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement**. Cambridge: CAB International (CABI), 2003. p. 1–18.

MUCHOW, R. C. Comparative productivity of maize, sorghum and pearl millet in a semi-arid tropical environment II. Effect of water deficits. **Field Crops Research**, v. 20, n. 3, p. 207–219, 1 abr. 1989.

NELSON, W. C. D. *et al.* Testing pearl millet and cowpea intercropping systems under high temperatures. **Field Crops Research**, v. 217, p. 150–166, 2018a.

____. Testing pearl millet and cowpea intercropping systems under high temperatures. **Field Crops Research**, v. 217, p. 150–166, 1 mar. 2018b.

NIELSEN, D. C.; VIGIL, M. F. Water use and environmental parameters influence proso millet yield. **Field Crops Research**, v. 212, p. 34–44, 1 out. 2017.

O'SHAUGHNESSY, S. A. *et al.* Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 10, p. 1523–1535, 1 ago. 2011.

O'SHAUGHNESSY, S. A. *et al.* A crop water stress index and time threshold for automatic irrigation scheduling of grain sorghum. **Agricultural Water Management**, v. 107, p. 122–132, maio 2012.

OGREN, E. Convexity of the Photosynthetic Light-Response Curve in Relation to Intensity and Direction of Light during Growth. **Plant physiology**, v. 101, n. 3, p. 1013–1019, 1 mar. 1993.

OLIVEIRA, T. K. DE; CARVALHO, G. J. DE; MORAES, R. N. D. S. Plantas de cobertura e seus efeitos sobre o feijoeiro em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 8, p. 1079–1087, ago. 2002.

OSROOSH, Y. *et al.* Automatic irrigation scheduling of apple trees using theoretical crop water

stress index with an innovative dynamic threshold. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 118, p. 193–203, 2015.

PADAKANDLA, S. R. Climate sensitivity of crop yields in the former state of Andhra Pradesh, India. **Ecological Indicators**, v. 70, p. 431–438, 1 nov. 2016.

PAYERO, J. O.; NEALE, C. M. U.; WRIGHT, J. L. Non-water-stressed baselines for calculating Crop Water Stress Index (CWSI) for alfalfa and tall fescue grass. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 48, n. 2, p. 653–661, 2005.

PESSARAKLI, M. **Handbook of Photosynthesis, Second Edition (Books in Soils, Plants, and the Environmen)**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://nishat2013.files.wordpress.com/2013/11/handbook-of-photosynthesis.pdf>>. Acesso em: 26 ago. 2018.

POU, A. *et al.* Validation of thermal indices for water status identification in grapevine. **Agricultural Water Management**, v. 134, p. 60–72, mar. 2014.

RAKSHIT, S. Millets, Their Importance, and Production Constraints. **Biotic Stress Resistance in Millets**, p. 3–19, 1 jan. 2016.

RAMÍREZ, A. J. F. *et al.* DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTRESSE HÍDRICO EM TOMATEIROS CEREJA (*Lycopersicum Solanum* var. *cerasiforme*.) COM CÂMARA INFRAVERMELHA. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 9, n. 4, p. 218–224, 2015.

SAGE, R. F.; PEIXOTO, M. M.; SAGE, T. L. Photosynthesis in Sugarcane. **Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology**, p. 121–154, 2013.

SCHOLANDER, P. F. *et al.* HYDROSTATIC PRESSURE AND OSMOTIC POTENTIAL IN LEAVES OF MANGROVES AND SOME OTHER PLANTS. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 52, n. 1, p. 119–25, jul. 1964.

SEZEN, S. M. *et al.* Evaluation of crop water stress index (CWSI) for red pepper with drip and furrow irrigation under varying irrigation regimes. **Agricultural Water Management**, v. 143, p. 59–70, 1 set. 2014.

SHARMA, B.; MOLDEN, D.; COOK, S. Water use efficiency in agriculture: Measurement, current situation and trends. *In*: DRECHSEL, P. *et al.* (Eds.). . **Managing Water and Fertiliser for Sustainable Intensification**. First edit ed. Paris, France: International Fertilizer Industry Association (IFA), International Water Management Institute (IWMI), International Plant Nutrition Institute (IPNI) and International Potash Institute (IPI), 2015. p. 39–64.

SILVA BARROS, T. H. DA *et al.* Influence of Sugarcane Genotype and Soil Moisture Level on the Arbuscular Mycorrhizal Fungi Community. **Sugar Tech**, p. 1–9, 16 jul. 2018.

SOUZA, R. P. *et al.* Photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and some associated metabolic changes in cowpea (*Vigna unguiculata*) during water stress and

recovery. **Environmental and Experimental Botany**, v. 51, n. 1, p. 45–56, 1 fev. 2004.

STEDUTO, P. *et al.* Crop yield response to water. **FAO Irrigation and drainage paper**, v. 66, n. August 2016, p. 70–87, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology (Sixth Edition)**. Universitat Jaume I, 2015.

THOMSON, S. J. *et al.* Potential and Challenges in Use of Thermal Imaging for Humid Region Irrigation System Management. **Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 4, 2012.

TOSCANO, S. *et al.* Leaf physiological and anatomical responses of Lantana and Ligustrum species under different water availability. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 127, p. 380–392, 1 jun. 2018.

VADEZ, V. *et al.* Small temporal differences in water uptake among varieties of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) are critical for grain yield under terminal drought. **Plant and Soil**, v. 371, n. 1–2, p. 447–462, 10 out. 2013.

VEYSI, S. *et al.* A satellite based crop water stress index for irrigation scheduling in sugarcane fields. **Agricultural Water Management**, v. 189, p. 70–86, 2017a.

_____. A satellite based crop water stress index for irrigation scheduling in sugarcane fields. **Agricultural Water Management**, v. 189, p. 70–86, 2017b.

WANG, D.; GARTUNG, J. Infrared canopy temperature of early-ripening peach trees under postharvest deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 11, p. 1787–1794, 2010.

WINKEL, T.; RENNO, J.-F.; PAYNE, W. A. Effect of the timing of water deficit on growth, phenology and yield of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) grown in Sahelian conditions. **Journal of Experimental Botany**, v. 48, n. 5, p. 1001–1009, 1 maio 1997.

XU, B. *et al.* Gas exchange, biomass partition, and water relationships of three grass seedlings under water stress. **Weed Biology and Management**, v. 6, n. 2, p. 79–88, 1 jun. 2006.

YOUSEFZADEH NAJAFABADI, M.; EHSANZADEH, P. Photosynthetic and antioxidative upregulation in drought-stressed sesame (*Sesamum indicum* L.) subjected to foliar-applied salicylic acid. **Photosynthetica**, v. 55, n. 4, p. 611–622, 14 dez. 2017.

YU, M.-H. *et al.* Using Plant Temperature to Evaluate the Response of Stomatal Conductance to Soil Moisture Deficit. **Forests**, v. 6, n. 10, p. 3748–3762, out. 2015.

ZHANG, D. *et al.* Vapour pressure deficit control in relation to water transport and water productivity in greenhouse tomato production during summer. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 43461, 7 dez. 2017.

ZHAO, P. *et al.* Genetic variation in sugarcane for leaf functional traits and relationships with

cane yield, in environments with varying water stress. **Field Crops Research**, v. 213, p. 143–153, 1 nov. 2017.

2 INFLUÊNCIA DO ESTRESSE HÍDRICO NA PRODUÇÃO DE CARQUEJA (*Baccharis crispa* SPRENG.): ABORDAGEM TERMO-FISIOLÓGICA

Resumo

A escassez de água para fins agrícolas aumenta a demanda por métodos e técnicas que melhoram a eficiência de irrigação, inclusive para detecção da variabilidade espacial do estresse hídrico das plantas no campo. Deste modo pode-se evitar declínios no rendimento das culturas e aumentar a produtividade da água na agricultura irrigada. A termografia por infravermelho é uma das alternativas mais promissoras para avaliar espacialmente o estado da água das culturas irrigadas. Tal avaliação é importante na produção de plantas medicinais, pois o manejo de precisão da irrigação assegura alta rentabilidade ao agricultor em função da produtividade e qualidade obtidas. Este trabalho teve o objetivo de avaliar as trocas gasosas, a fotossíntese e a temperatura das folhas da planta medicinal carqueja (*Baccharis crispa* Spreng.), por meio de um sistema de analisador de gases por infravermelho e de uma câmera termal. O experimento foi conduzido sob delineamento em blocos casualizados, com seis (06) tratamentos e quatro (04) repetições, nos meses de setembro 2015 até setembro de 2016, em vasos instalados em uma casa de vegetação na ESALQ/USP, Piracicaba, SP. Os tratamentos foram níveis de reposição hídrica baseados na evapotranspiração de referência (ET_o): 25, 50, 75, 100, 125 e 150% ET_o. Os parâmetros fisiológicos avaliados foram: taxa de fotossíntese (A), condutância estomática (g_s) e taxa de transpiração (E). Além disso foram avaliadas suas correlações com a diferença de temperatura entre folhas e o ar (T_c-T_a). Na análise estatística (teste de Tukey, p<0,05) foram observados efeitos significativos dos níveis de reposição hídrica sobre a temperatura foliar, a produtividade e o índice de estresse hídrico da cultura (CWSI), e correlações significativas entre as variáveis fisiológicas e (T_c-T_a). Os resultados mostraram que as ferramentas usadas são bons instrumentos para diagnóstico dos efeitos do déficit hídrico sobre a carqueja, que pode afetar o uso e o rendimento da água na irrigação dessa cultura.

Palavras chave: Carqueja; Manejo de irrigação; Estresse hídrico; Termografia por infravermelho

Abstract

Water scarcity for agricultural purposes increases demand for techniques that increase irrigation efficiency (water productivity); one of this technique is the spatial variability detection of the water stress of the plants in the field. In this way one can avoid declines in crop yields and increase water productivity in irrigated agriculture under variable rate technology. Infrared thermography is one of the most promising alternatives for spatially assessing the water status of irrigated crops. Such an evaluation is important in the production of medicinal plants, since precision irrigation management ensures high profitability to the farmer due to the exceptional biomass productivity and uniform oil quality obtained. The objective of this work was to evaluate the gas exchange, photosynthesis and temperature of the leaves of the medicinal plant *carqueja* (*Baccharis crispa* Spreng.), By means of an infrared gas analyzer system and a thermal camera. The experiment was conducted under a randomized block design, with six (06) treatments and four (04) replicates, from September 2015 to September 2016, in pots installed in a greenhouse at ESALQ / USP, Piracicaba, SP. The treatments were water replacement levels based on reference evapotranspiration (ET_o): 25, 50, 75, 100, 125 and 150% ET_o. The physiological parameters evaluated were: photosynthesis rate (A), stomatal conductance (g_s)

and transpiration rate (E); in addition, their correlation with the temperature difference between leaves and air ($T_c - T_a$) was evaluated. Statistical analysis (Tukey's test, $p < 0.05$) showed significant effects of water replenishment levels on leaf temperature, yield and water stress index of the crop (CWSI), and significant correlations between physiological variables and ($T_c - T_a$). The results showed that the tools used are good tools for diagnosing the effects of the water deficit on the carqueja, which can affect the use and yield of water in the irrigation of this crop.

Keywords: Carqueja; Irrigation management; Hydrical stress; Infrared Thermography

2.1 Introdução

O uso de plantas medicinais como terapia alternativa é uma prática milenar para tratar muitas doenças (JANUÁRIO et al., 2004; DUTRA et al., 2016). Assim, a produção de plantas medicinais é uma prerrogativa interessante para os produtores familiares, em virtude da alta rentabilidade, absolutamente necessária em áreas menores, e da necessidade de mão-de-obra intensiva e frequente para condução da cultura (SOUZA; PEREIRA; FONSECA, 2012).

Ressalta-se que, além do alto retorno econômico, a produção de plantas medicinais também contribui para a conservação de espécies em risco de extinção (SOUZA; PEREIRA; FONSECA, 2012; VAN WYK; PRINSLOO, 2018). A coleta de plantas medicinais no ambiente natural de maneira predatória é uma preocupação global, pois pode promover a extinção de plantas, correndo-se o risco de perda de princípios ativos para o desenvolvimento de futuros medicamentos (SOUZA; PEREIRA; FONSECA, 2012; VAN WYK; PRINSLOO, 2018).

Os produtos à base de plantas medicinais surgem como uma forte tendência mundial, sendo considerado um mercado promissor com números expressivos, tornando-se um ambiente de negócio atrativo. Existe um aumento da oferta e da demanda de plantas medicinais; entretanto, o sistema produtivo encontra-se deficiente e despreparado para atender a esse novo mercado (Moreno Pizani, 2017; Pichi et al., 2012). Este potencial das plantas medicinais como fonte de novos medicamentos, associado ao desenvolvimento de um cultivo sistemático, utilizando técnicas racionais de cultivo agrícola, torna-se promissor e a necessidade de garantir a sustentabilidade ambiental propicia um amplo campo para a investigação científica (Andrião, 2010; Moreno Pizani, 2017; Pacheco et al., 2011; Pichi et al., 2012).

A produção de óleos essenciais está relacionada à taxa fotossintética da planta, por causa da biossíntese de terpenos em cloroplastos. A carqueja, como uma planta de clima tropical, possui sua maior taxa fotossintética em períodos de maior radiação, podendo alcançar altas produções de óleo essencial nesta fase, quando não há limitações de outros fatores ambientais (Marchese and Figueira, 2005; Moreno Pizani, 2017). São poucos os trabalhos sobre efeito do estresse hídrico em plantas medicinais. O efeito sobre tais produtos parece variar bastante com o tipo, a intensidade e a duração do estresse, podendo aumentar ou diminuir o teor de óleos essenciais. Plantas irrigadas podem compensar o baixo teor de princípios ativos com maior produção de biomassa, o que resulta em maior rendimento final de princípios ativos por área (Hussain et al., 2011; Moreno Pizani, 2017).

Dentre as diversas plantas medicinais utilizadas na indústria farmacológica, destaca-se a carqueja (*Baccharis crispa* Spreng.), uma espécie da família das Asteraceae. Oriunda da bacia do Rio da Prata, que abrange partes de Brasil, Uruguai, Paraguai e Argentina (MINTEGUIAGA et al., 2018), essa planta vem recebendo atenções por parte da indústria e da comunidade farmacêutica. Tem potencial de alívio de distúrbios gastrointestinais, hepáticos, diabetes, reumatismo, má circulação sanguínea e processos inflamatórios (JANUÁRIO et al., 2004; BORELLA et al., 2006; DE OLIVEIRA et al., 2012).

A capacidade adaptativa dos sistemas de produção de plantas medicinais requer melhor compreensão de práticas inteligentes em relação ao manejo das culturas, devido às incertezas das chuvas e dos problemas causados pelo déficit hídrico em regiões tropicais e subtropicais (ARBUCKLE et al., 2013; NILES; LUBELL; BROWN, 2015). Embora existam pesquisas em andamento para avaliar a adoção de inovações de manejo que melhorem a rentabilidade e a qualidade dos cultivos medicinais, sua abrangência ainda é bastante restrita (GERHARDS et al., 2016; VINCENT; SCHAFFER; ROWLAND, 2018).

A disponibilidade de água e nutrientes influencia diretamente a qualidade e a quantidade de constituintes bioativos produzidos por plantas medicinais. Em bons níveis de fertilidade, condições adequadas de umidade no solo garantem o bom desenvolvimento vegetativo e uma produção em condições satisfatórias, obtendo-se os níveis desejados dos principais princípios ativos contidos nas plantas medicinais (MEIRA et al., 2013b).

Segundo Moreno Pizani, (2017) são poucos os trabalhos relacionados com o efeito do estresse hídrico e/ou irrigação no sistema de cultivo de plantas medicinais; e poucos aqueles que tratam do manejo do uso da água no sistema de cultivo, principalmente em relação às

espécies nativas brasileiras com potencial econômico. Entre estas espécies se podem citar: manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) (PRAVUSCHI et al., 2010); calêndula (*Calendula officinalis* L.) (Aleman and Marques, 2016; Bortolo et al., 2009); alecrim (*Rosmarinus officinalis* L.) (SINGH, 2004); alecrim pimenta (*Lippia sidoides* Cham.) (ALVARENGA et al., 2012); melissa (*Melissa officinalis* L.) (MEIRA et al., 2013a); coentro (*Coriandrum sativum* L.) (JAMALI, 2012) e erva-lúia (*Aloysia triphylla* (L'Hér.) Britton) (AL-MEFLEH; ABU SALAH; ABANDEH, 2012).

Estudos recentes revelaram que o estresse hídrico severo pode reduzir significativamente a síntese de substâncias bioativas nas folhas, afetando a capacidade dos extratos de inibir o crescimento de patógenos (OSUAGWU; EDEOGA, 2013); KHOSH-KHUI et al. (2012); (AYAZ; KADIOGLU; TURGUT, 2000); (PEYVANDI, 2013).

A biossíntese de óleo essencial nas plantas medicinais é um processo bioquímico exotérmico e dependente da luz e do oxigênio; com isso um manejo racional da irrigação pode potencializar a biossíntese do óleo essencial (BROCHOT et al., 2017). Alguns estudos já comprovaram que o estresse hídrico possibilita a maior produção de óleo essencial pelas plantas medicinais (Moreno Pizani, 2017; Nowak et al., 2010; Rioba et al., 2015).

A necessidade frequente de melhorar a eficiência produtiva dos sistemas agrícolas, tende a direcionar pesquisas para a busca de técnicas inovadoras (BIANCHI et al., 2018; KLEM et al., 2018), dentre as quais destaca-se a termografia por infravermelho para detecção espacial de déficit hídrico (DEERY et al., 2016; CRAPARO et al., 2017; GARCÍA-TEJERO et al., 2017). A detecção do estresse hídrico usando termografia apresenta desempenho elevado e permite alto número de repetições a baixo custo, quando o intuito é estudar grandes áreas (GARCÍA-TEJERO et al., 2017).

A temperatura das folhas está fortemente relacionada aos processos de abertura estomática, transpiração e fotossíntese (JONES, 2004; DEERY et al., 2016; KHORSANDI et al., 2018). A termografia por infravermelho é uma ferramenta com potencial de destaque, particularmente no cálculo de índices térmicos que apresentam boa interação com a resposta fisiológica das culturas (CRAPARO et al., 2017). Dentre os diversos índices desenvolvidos para tal finalidade, a literatura ressalta o *Crop Water Stress Index* – CWSI, devido à sua robustez e aplicabilidade na identificação de estresse hídrico no campo (IDSO et al., 1980; RAY D. JACKSON, 1982; MANGUS; SHARDA; ZHANG, 2016). A termografia por infravermelho traz uma abordagem mais dinâmica na aplicação de técnicas voltadas à irrigação de precisão, com base

no uso de sensoriamento remoto e no sensores embarcados para monitorar o status hídrico das culturas em macro e micro escala (KHANAL; FULTON; SHEARER, 2017).

A hipótese é que a associação entre termografia e o conhecimento das trocas gasosas possibilita avaliar o status da água da cultura da carqueja em função do CWSI (*crop water stress index*). Para testar esta hipótese, realizou-se um experimento em casa de vegetação representando diferentes condições de manejo hídrico (níveis de reposição de água no solo). E teve como objetivos analisar as imagens térmicas e as trocas gasosas na planta da carqueja e estabelecer suas relações com o estresse hídrico; avaliar o índice de estresse hídrico para a planta e suas correlações com as características térmicas.

2.2 Material e métodos

Local do experimento

O experimento foi conduzido de setembro de 2015 a setembro de 2016, na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil (22°43' S; 47°38'W, 546 m de altitude em relação ao nível do mar). As plantas de carqueja foram cultivadas em casa de vegetação com área total de 144 m², em vasos de 11 litros. Os vasos foram distribuídos equidistantes e as plantas apresentaram espaçamento de 0,30 x 0,30 m, que é recomendado pela EMBRAPA para o cultivo dessa espécie (VAZ; JORGE, 2006).

Caracterização física do solo

Amostras indeformadas de solo foram coletadas para a obtenção das curvas características de retenção de água no solo (CRA), por meio de mesa de tensão (-1, -2, -4 e -6 kPa) e extrator de "Richards", com câmara de pressão e placas porosas (-10, -30, -50, -100, -500, -1000 e -1500 kPa). Também foram feitas determinações de densidade global (Ds), densidade das partículas (Dp) e porosidade total (α) do solo (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização físico-química do solo.

Areia	Silte	Argila	Ds	K _h	θ _{cc}	θ _{PMP}	pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al
g kg ⁻¹			g cm ⁻³	mm h ⁻¹	cm ³ cm ⁻³		CaCl ₂	mg dm ⁻³		mmol _c dm ⁻³		
134	85	781	1.54	6.5	0.243	0.097	5.3	5.3	61.0	2.0	1.0	1.5

* A caracterização química e física do solo foi realizada de acordo com os métodos padrões adotados para solos tropicais (Raij et al., 2001). Resumidamente, o pH foi determinado em solução de CaCl₂ (0,01M); P, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ em resina de troca iônica; Solução de H + Al em KCl (1M); areia, silte e argila pelo método do hidrômetro de Bouyoucos; MO (matéria orgânica) pelo método Walkley-Black; e θ_{cc} e θ_{PWP} por meio do extrator de Richards.

Manejo da irrigação nas condições experimentais

A irrigação foi realizada por meio de gotejadores, com vazão nominal de 4 L h⁻¹ e fluxo bifurcado em 2 estacas. Antes de cada ciclo de cultivo foram realizadas avaliações de desempenho hidráulico da vazão dos emissores, para determinação do coeficiente de uniformidade de Wilcox- Swailes (CUE) e do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC). Ambos os coeficientes apresentaram valores adequados, variando de 95,0 a 97,8% nos testes realizados. O turno foi variou de um a dois dias dependendo da demanda das plantas.

Concepção experimental e análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com seis (06) tratamentos e quatro (04) repetições. Os níveis de reposição de água foram calculados com base na evapotranspiração de referência, estimada dentro da estufa (100% ETo*). Assim, os níveis de reposição por irrigação foram estabelecidos em 25, 50, 75 100, 125 e 150% da ETo*. Vale ressaltar que nos níveis de reposição hídrica de θ_{cc} houve drenagem, foi levado em consideração todo o volume de água aplicado em cada tratamento.

A evapotranspiração de referência dentro da estufa (ETo*) foi estimada a partir de dados coletados com uma estação meteorológica automática, utilizando-se o método de Penman-Monteith. O vento dentro da estufa foi medido por meio de um anemômetro instalado a 2 m de altura.

As avaliações das plantas foram realizadas em dois ciclos de cultivo (plantio e rebrota) até a fase de corte da biomassa, antes do florescimento.

A comparação das médias foi realizada pelo teste de Tukey (p<0,05). O Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Critério de Informação Bayesiano (AIB) e o p-valor (p<0,05) foram utilizados para selecionar os modelos que apresentaram melhor ajuste, e o intervalo de

confiança para 95% das observações. As análises de correlação de Pearson foram usadas para estudar: (i) as relações entre as trocas gasosas (fotossíntese - A , transpiração - E e condutância estomática - g_s) e as diferenças de temperatura entre a cultura e o ar ($T_c - T_{ar}$), nos níveis de reposição hídrica baseados na ETo; (ii) a correlação do Índice de estresse hídrico da cultura (CWSI) com os níveis de reposição hídrica baseados na ETo. As análises estatísticas foram realizadas com o software R v.3.3.4 (R Core Team 2016), utilizando os pacotes ExpDes.pt e ggplot2 (Wilkinson 2011). A análise de redundância – RDA foi realizada com auxílio do software Canoco® for Windows v. 4.5.

Quantificação da produtividade da biomassa

A produtividade de biomassa seca de cada unidade experimental foi medida com auxílio de balança digital com capacidade máxima de 3 0 kg e precisão de 0,001kg. As amostras foram secas em estufa a 65°C durante 72 horas, e pesadas para a obtenção do peso de matéria seca ao fim de cada ciclo de produção.

Termografia por infravermelho

A temperatura das folhas foi obtida por meio de imagens térmicas, com câmera de infravermelho marca Flir, modelo T640, com resolução de 640 x 480 pixels, emissividade - ϵ = (0.98), precisão de $\pm 0,06$ °C, sensibilidade termal de 0,035°C e faixa de temperatura de trabalho de -40°C a 2.000°C.

As imagens térmicas foram tomadas em conjunto com as medidas das trocas gasosas nas folhas das plantas, a fim de observar as relações entre temperatura foliar e as trocas de gases com o ambiente, em função dos respectivos tratamentos de irrigação. O processamento e a análise de dados foram realizados por meio do software Flir Tools V. 5.2.15161. As imagens foram obtidas a uma altura de aproximadamente 1,0 m acima das plantas, em cada unidade experimental (Figura 1).

Figura 1. Imagens termais para os níveis de reposição hídrica de 25% (a); 50% (b); 75% (c); 100% (d); 125%(e) e 150% (f) da ET₀ (Quanto mais escura a cor na imagem termal menor a temperatura da folha). Vista superior da imagem térmica (g) e imagem visível (h).

Dados de temperatura do ar e déficit de pressão de vapor do ar foram obtidos por meio de uma estação meteorológica automática instalada dentro da casa de vegetação. Com essas informações e as imagens termais, calculou-se o Índice de Estresse Hídrico da Cultura (*Crop Water Stress Index – CWSI*), conforme a metodologia proposta por Jackson et al. (1988), usando a Equação 1:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LBI}}{(T_c - T_a)_{LBS} - (T_c - T_a)_{LBI}} \quad (1)$$

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 à diferença de temperatura do ar para uma cultura sem déficit hídrico, quando a resistência para a perda de água é nula, ou correspondente à temperatura da superfície molhada, °C; $(T_c - T_a)_{LBS}$ – linha base de temperatura superior, correspondente à diferença de temperatura do ar quando a resistência para a perda de água do dossel aumenta sem limites, ou correspondente à temperatura da superfície seca, °C.

As linhas base das temperaturas inferior e superior foram obtidas por meio da mínima e da máxima diferença encontradas entre a temperatura da cultura observada (T_c) e a temperatura média do ar (T_a).

Mensuração dos dados meteorológicos in loco

O monitoramento da radiação solar global (Q_g) se deu por meio de piranômetro de fotodiodo de silício (LI200X - Campbell Sci.). Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa (%) foram obtidas com sensor Vaissala (HMP45C - Campbell Sci. A velocidade do vento foi obtida com anemômetro. Todos os sensores foram instalados no interior da casa de vegetação e a coleta de dados médios foi feita em intervalos de 15 minutos.

Mensurações das trocas gasosas

As trocas gasosas (H_2O e CO_2) realizadas pelas plantas foram medidas com sistema portátil analisador de gases por infravermelho (LI-6400XT, Li-cor). As medições de trocas gasosas foram realizadas entre os horários de 09:00 h e 13:00 h, e a concentração de CO_2 no ar durante as medições foi fixada em $400 \pm 5 \mu\text{mol}^{-1}$. A umidade relativa à temperatura ambiente mantida no interior da câmara ficou entre 50 e 60%. Para determinação da densidade do fluxo de fótons fotossinteticamente ativo - DFFFA - no interior da câmara foi estimada uma curva de resposta fotossintética à luz entre 0 e $2500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a fim de determinar os valores de irradiação ideais para as leituras pontuais. As folhas escolhidas foram as da região central da planta, com exposição total à irradiação.

2.3 Resultados e discussão

Nas Figuras 2a e 2b pode ser observada a dinâmica da temperatura no interior da casa de vegetação no decorrer dos dois ciclos de cultivos, em cada estação do ano, com médias registradas a cada 15 minutos e valores em escala horária no mesmo período. Os valores médios de temperatura em cada estação foram de $26,7^{\circ}\text{C}$ no verão, $25,2^{\circ}\text{C}$ na primavera, $22,2^{\circ}\text{C}$ no outono e $20,32^{\circ}\text{C}$ no inverno.

Houve grande amplitude de temperaturas ao longo do experimento (de 44°C no verão a 3°C no inverno). O gradiente médio de temperatura entre os períodos de inverno e verão foi de $6,3^{\circ}\text{C}$.

Figura 2. Variação da temperatura do ar (°C) no interior da casa de vegetação no decorrer do período experimental e em cada uma das estações do ano (a), e (b) variação horária da temperatura no mesmo período. Os círculos com bordas brancas representam a média de cada dia, a área sombreada ressalta os horários de análises.

Nos cultivos de plantas mesófilas a amplitude térmica para o crescimento e desenvolvimento ótimos é relativamente estreita, cerca de 10°C (TAIZ; ZEIGER, 2015). Fora dessa faixa de temperatura pode haver danos em função da magnitude do tempo de exposição às condições de estresse térmico. Assim, a temperatura atua como modulador e influencia diretamente a translocação de carboidratos da folha para diversos órgãos das plantas (ROMERO-ROMERO et al., 2018). A falta de translocação e o acúmulo de carboidratos na folha afetam negativamente a atividade fotossintética, por meio de um mecanismo de *feedback* final do produto (TOMBESI et al., 2019).

Na Figura 3 pode-se ver a oscilação do déficit de pressão de vapor (DPV - diferença entre a pressão de vapor atual – e_a - e a pressão de saturação de vapor - e_s). Este índice pode relacionar-se com parâmetros das trocas gasosas das plantas, por exemplo, com a resistência estomática (LYNN; CARLSON, 1990). A média geral esteve em torno de 0,91 kPa, e a média diária na primavera (1,0 kPa) foi maior que nas outras estações. Isto indica que a pressão de saturação diária não foi consistentemente maior que a pressão de saturação na primavera (Figura 3). Entretanto os valores mensais, indicam que na estação de outono foram registrados os menores valores de DPV (média de 0,77 kPa).

Quando o DPV é maior, as plantas estão sujeitas a maiores níveis estresse, com maior frequência e tempo no fechamento de estômatos. Isto reduz a produtividade de biomassa e

consequentemente traz efeitos positivo ou negativo para a produção de compostos fenólicos dependendo nível de estresse (LYNN; CARLSON, 1990)

Figura 3. Déficit de pressão de vapor – DPV no interior da casa de vegetação durante o período experimental.

A curva de resposta da fotossíntese à luz foi medida a fim de identificar a faixa de luz ótima a ser utilizada nas leituras pontuais das trocas gasosas na cultura (Figura 4). A máxima taxa de assimilação de CO_2 ocorreu com intensidade de irradiação de $1500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ de fótons, chegando à assimilação da ordem de $9 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

A intensidade da irradiação (ou luz) é o fator ambiental chave para a fotossíntese (OSROOSH et al., 2015). Assim, a resposta da fotossíntese foliar (A) à curva de assimilação de CO_2 tem sido objeto de vários estudos, a fim de identificar o nível ótimo de irradiação para a fotossíntese foliar (INOUE et al., 1990; MAES et al., 2011; ÇOLAK et al., 2015). A curva tem um intercepto negativo, que representa a taxa de respiração (é negativo porque a respiração libera CO_2 , ao invés de usá-lo) (Figura 4). O intercepto x nesta curva mostra o equilíbrio entre o uso e incorporação de CO_2 pela fotossíntese e sua liberação pela respiração. Este ponto é chamado de ponto de compensação de luz (TAIZ; ZEIGER, 2015). Uma planta basicamente que se mantém nessa intensidade de luz não pode crescer, reproduzir-se ou defender-se. Em intensidades de luz acima do ponto de compensação (cerca de $125 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), a planta pode aumentar suas reservas, crescer e reproduzir-se (MARCHIORI; MACHADO; RIBEIRO, 2014; TAIZ; ZEIGER, 2015).

Na Figura 4 observa-se a cinética de saturação da curva de nivelamento com o uso da luz. Em intensidades abaixo do ponto de compensação, a planta está usando suas reservas e

morrerá se elas forem esgotadas. Em intensidades de irradiação mais baixas (início da zona amarela do gráfico) seu incremento proporciona aumentos consideráveis na assimilação CO_2 (TAIZ; ZEIGER, 2015). Em intensidades de luz mais altas (fim da zona amarela e zona laranja do gráfico), o fornecimento de luz adicional não aumenta tanto a fotossíntese, provavelmente porque a disponibilidade de CO_2 é limitante à fotossíntese (MARCHIORI; MACHADO; RIBEIRO, 2014; JANKA et al., 2015).

Figura 4. Curva de luz em resposta da taxa de assimilação de $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ – A em resposta à variação da densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos – DFFFA para a condição de manejo de irrigação ao nível de reposição hídrica de 100% ETo.

Na Figura 5 (a; b) estão as imagens termais e visíveis da cultura da carqueja submetida aos seis níveis de reposição hídrica (25, 50, 75 100, 125 e 150% da ETo). Na Figura 5 (c) são mostradas as médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) para a temperatura foliar nas respectivas condições de manejo citadas.

Os maiores valores de temperatura foliar foram observados no tratamento 25% ETo (média de $33,7^\circ\text{C}$), que foi significativamente diferente das demais condições. As temperaturas mais baixas foram de $27,6^\circ\text{C}$; $28,0^\circ\text{C}$ e $28,2^\circ\text{C}$, nos tratamentos 100, 125 e 150% ETo, respectivamente; não houve diferenças significativas entre esses três tratamentos. Na Figura 5 (d) apresenta-se uma correlação significativa entre a temperatura foliar e os níveis de reposição ETo ($p < 0,001$) e ($R^2 = 0,81$). Resultados análogos foram observados em cultivos de citros, na Espanha (GARCÍA-TEJERO et al., 2011), e do trigo, no Egito (ELSAYED et al., 2017).

Figura 5. Imagens visíveis (a) imagem térmica para os níveis de reposição hídrica de 150%, 125%, 100%, 75%, 50% e 25% da ETo (b), Temperatura foliar °C (c) e (d) relação entre temperatura foliar e ETo, médias seguidos pela mesma letra não diferem em 5% probabilidade pelo teste de Tukey, CV coeficiente de variação. (Quanto mais escura a cor na imagem termal menor a temperatura da folha).

Sob alta radiação solar e condições de déficit hídrico, a condutância estomática diminui quando a umidade do solo não é adequada para acompanhar as demandas por evaporação; e isso, por sua vez, aumenta a temperatura foliar (Jones e Leinonen, 2003; Urban et al., 2007). O traço morfológico da planta, como a arquitetura do dossel, também influencia a temperatura foliar, não apenas pelo ângulo das folhas em relação à fonte de luz, mas também pelo grau de sombreamento mútuo no dossel (TAIZ; ZEIGER, 2015).

A temperatura da folha é uma das muitas características fisiológicas que podem ajudar a identificar cultivares tolerantes à seca, e pode ser determinada pela resistência aerodinâmica (DEACON, 1974). Geralmente a estimativa da resistência aerodinâmica requer um perfil de vento acima de uma superfície uniforme da copa, com um período de medição relativamente longo (RITARI; STRÖMMER, 1985). Isto não é prático do ponto de vista operacional e técnico (KHORSANDI et al., 2018). Devido à necessidade de métodos mais viáveis e práticos, métodos de diagnósticos das condições hídricas das culturas vêm sendo estudados por diversos pesquisadores, a fim de reduzir os impactos do déficit hídrico sobre as culturas (BAHMANI; SABZIPARVAR; KHOSRAVI, 2016; VEYSI et al., 2017; GARCÍA-TEJERO et al., 2018).

As câmeras térmicas vêm facilitando uma nova abordagem, na qual as temperaturas mínima e máxima são extraídas diretamente dos alvos de referência obtidos na imagem. Esta abordagem direta não requer medições microclimáticas externas ou dados de propriedade da planta, o que reduz a necessidade de recursos humanos e financeiros (COTIČ et al., 2015; EGEE et al., 2017).

Como fator negativo, destaca-se um dos potenciais obstáculos para o monitoramento da temperatura das folhas: o tempo livre de nuvens para obtenção de imagens é pouco frequente durante o período de crescimento de diversas culturas agrícolas, principalmente em regiões temperadas (GARCÍA-TEJERO et al., 2018; KHORSANDI et al., 2018).

Melhorar a eficiência do uso de irradiação de cultivo, ou eficiência fotossintética, é uma forma crucial para melhorar a produtividade global das culturas (MARCHIORI; MACHADO; RIBEIRO, 2014; LIU et al., 2016). No entanto, o estresse hídrico decorrente da baixa umidade do solo impõe um grande desafio para a agricultura mundial (LIMA et al., 2016). Os resultados deste trabalho indicam que o estresse hídrico pode diminuir a fotossíntese na irradiância naturalmente flutuante, dependendo de sua gravidade, embora as características de fotossíntese em estado estacionário fossem semelhantes. Isso aumenta a importância dos esforços globais para mitigar os efeitos negativos do estresse hídrico para a agricultura sustentável (TAGHVAEIA; BALLESTER et al., 2013; SANTESTEBAN et al., 2017).

Os dois eixos gerados pela análise de redundância (RDA) representam 72,7% da variabilidade das condições de manejo impostas. A análise dos agrupamentos resultou em uma forte segregação das amostras em grupos distintos, de acordo com os níveis de reposição hídrica. Os grupos de 25, 50 e 100% ETo são facilmente destacados (Figura 6 a), sendo representados pelos polígonos. Nota-se também que as condições de 125 e 150% ETo apresentam sobreposição, quando comparados aos demais grupos. As aproximações dos vetores indicam o quanto uma variável está correlacionada à outra. Para exemplificar, as variáveis de variação de temperatura ($T_c - T_a$) e temperatura da folha T_{leaf} apresentam correlação significativa ($R^2=0,99$ $p<0,001$) (Figura 6 b). Esses vetores próximos ao agrupamento de 25% ETo também indicam quanto os vetores resposta (A, E, g_s , massa seca e massa fresca) são sensíveis à variação de temperatura e à temperatura foliar.

Na Figura 6 b são mostradas as relações entre as medidas de trocas gasosas foliares da fotossíntese líquida (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), e dos parâmetros de temperatura da folha - T_{leaf} (°C), temperatura do ar T_{air} (°C), variação entre T_{leaf} e T_{air} , biomassa

fresca (g) e biomassa seca (g), uso da água em cada condição de manejo e produtividade da água (kg m^{-3}).

Figure 6. Análise de redundância (RDA) (a) e correlações (coeficiente de correlação de Pearson) (b) entre medidas da fotossíntese líquida (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), temperatura do ar (T_{air}), temperatura da cultura - temperatura do ar ($T_c - T_a$), temperatura da folha / cultura (T_{leaf}), biomassa fresca, biomassa seca e produtividade de água (W_p).

As correlações estudadas produziram resultados consistentes e significativos para a relação entre A e g_s ($R^2=0,81$; $p<0,001$), A e E ($R^2=0,79$; $p<0,001$). Também houve resultados significativos e expressivos nas relações da biomassa seca com as trocas gasosas A, g_s , E, $T_c - T_a$, T_{leaf} , e o uso da água ($R^2=0,75$; 0,57; 0,57; 0,61; 0,65 e 0,68 $p<0,001$), respectivamente. Tais resultados podem contribuir para melhorar o manejo racional da cultura, a fim de se obter maiores produtividades. A produtividade da água e a temperatura do ar produziram relações não significativas ($p>0,05$), exceto para as relações entre produtividade da água e temperatura do ar, biomassa seca e uso da água (Figura 6 a).

Vários pesquisadores têm-se dedicado ao desenvolvimento de trabalhos para otimizar o uso da termografia na avaliação do status da água da cultura e na programação da irrigação (JONES, 1999, 2004; GRANT et al., 2012). Há vários relatos de correlações significativas entre informações térmicas e variáveis fisiológicas relacionadas. Os resultados deste trabalho corroboram com (GONZALEZ-DUGO; ZARCO-TEJADA; FERRERES, 2014; OSROOSH et al., 2015; CRAPARO et al., 2017), trazendo resultados significativos e expressivos para facilitar o

conhecimento da dinâmica do manejo de culturas de interesse agrícolas, tais como a carqueja.

Estudos sobre a aplicabilidade dessas técnicas em cultivos comerciais provaram que informações adicionais sobre o status da água na cultura são necessárias para avaliar adequadamente as informações e propor estratégias sustentáveis para a produção da cultura (FERNÁNDEZ, 2014). No caso do presente trabalho, as relações entre dados térmicos e fisiológicos foram derivadas para avaliar o estado da água na cultura, conforme mostram os coeficientes de correlação de Pearson obtidos para as relações (Figura 6).

Os parâmetros fisiológicos observados sob diferentes níveis de reposição hídrica, tais como a taxa de fotossíntese (A), a condutância estomática (g_s) e taxa de transpiração (E), foram afetados de forma significativa nos dois ciclos de cultivos estudados (Figura 7). Na assimilação de CO_2 , os maiores valores foram observados nas reposições de 100 e 125% da ETo , que não apresentaram diferenças significativas entre si e foram diferentes dos demais tratamentos, de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$) no segundo ciclo de cultivo, com taxas de 6,97 e 6,60 $\mu mol\ CO_2\ m^{-2}s^{-1}$. Quando comparados ao nível de reposição 100% ETo , os tratamentos 25 e 50% ETo apresentaram redução de 90,8 e 77,3% na assimilação de CO_2 (Figura 7 b).

Na condutância estomática - g_s , em ambos os ciclos de cultivo, os níveis de reposição hídrica de 75, 100 e 125% ETo não diferiram entre si as maiores taxas de g_s ocorreram nos tratamentos 100 e 125% ETo , com valores na ordem de 0,21 e 0,25 $mol\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$. Nos demais níveis foram observadas reduções significativas de g_s nos níveis de 25 e 50%, da ordem de 86 e 81%, respectivamente.

Os resultados foram semelhantes na taxa de transpiração - E , com destaque para o nível 100% ETo , com 3,67 $mmol\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$. Já nas condições de manejo de 25 e 50% ETo , as reduções chegaram a 82 e 66%, se comparados ao nível de 100%.

Figura 7. Resposta da assimilação de CO_2 (A), condutância estomática (g_s) $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e transpiração (E) $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para os níveis de reposição hídrica de 25, 50, 75, 100, 125, e 150% ETo para os dois ciclos de cultivos; médias seguidas pela mesma letra não diferem em 5% probabilidade pelo teste de Tukey, CV coeficiente de variação.

Assim como em outros organismos, a água nas plantas constitui a maior porção do volume celular e é o recurso limitante mais importante em todas as atividades fisiológicas (TAIZ; ZEIGER, 2015). Entender como as plantas reagem ao estresse hídrico é crucial para um gerenciamento racional da água, especialmente quando certas estratégias são adotadas, como é o caso do presente estudo sobre estresse por déficit e por excesso de água. A

fotossíntese serve como um sensor global de estresse hídrico, induzido pelo desequilíbrio da energia celular e que se reflete na distinta alteração no estado redox associado às membranas tilacóides (BISWAL et al., 2011; VINCENT; SCHAFFER; ROWLAND, 2018). Assim o déficit hídrico apresenta correlação direta com a fotossíntese.

A dinâmica das trocas gasosas na carqueja apresenta padrão similar ao de diversas culturas agrícolas. Sob estresse hídrico, as plantas mantêm seus estômatos total ou parcialmente fechados como forma de minimizar a perda de água e manter o turgor foliar, uma característica importante para a tolerância à seca (LAWLOR; TEZARA, 2009).

As leituras das trocas gasosas mostraram uma grande variação, provavelmente associada a diferenças nas condições de manejo adotadas, denotando que a planta apresenta alta sensibilidade ao estresse hídrico, como pode ser observado na Figura 7. O efeito da regulação estomática (fechamento parcial) sobre um estresse hídrico leve ou moderado é o aumento da temperatura das folhas, devido à redução na dissipação de calor pela transpiração. Como consequência, o crescimento da cultura é prejudicado devido à baixa assimilação de CO₂ e às alterações de sua concentração intercelular (WANG; GARTUNG, 2010; BEGUM et al., 2012; EGEE et al., 2017).

Essas reduções nas trocas gasosas provavelmente são oriundas da desidratação celular, que afeta processos fisiológicos básicos tais como redução do turgor, potencial hídrico foliar e inibição da expansão celular, além da resistência hídrica (TAIZ; ZEIGER, 2015; AVIVI; SOEPARJONO; ARIEZA RAMADHAN, 2016). Assim, a condutância estomática (g_s) e a fotossíntese líquida (A) são inibidas pelo estresse hídrico devido à diminuição no estado de ativação da enzima ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase (Rubisco) (CRAFTS-BRANDNER; SALVUCCI, 2002; MATHUR; AGRAWAL, 2014). Uma das funções dessa enzima é captar o CO₂ procedente do ar, razão pela qual a redução de sua ativação é prejudicial à fotossíntese.

As relações entre as variações da temperatura da cultura e do ar ($T_c - T_a$) e as características da troca gasosa foliar (A , g_s e E) foram determinadas no espaço e no tempo, para cada ciclo da cultura (Figura 8). Em geral, o segundo ciclo de cultivo apresentou as maiores correlações entre variações de temperatura ($T_c - T_a$) e trocas gasosas A , E e g_s ($R^2 = 0,50$; $R^2 = 0,86$; $R^2 = 0,82$ respectivamente, com $p < 0,01$) (Figura 8 b, d, e). No primeiro ciclo houve menor correlação entre as trocas gasosas e térmicas, exceto para a fotossíntese ($R^2 = 0,79$), que foi maior que no segundo ciclo. Já para g_s e E as correlações no primeiro ciclo (R^2

=0,55 e $R^2 = 0,35$ com $p < 0,01$) foram inferiores às do segundo ciclo (Figura 8 a, c, e). Vale salientar que em todas as correlações foram obtidos resultados significativos (Figura 8).

Figura 8. Relações entre assimilação de CO₂ (A), condutância estomática (g_s) mol H₂O m⁻² s⁻¹ e transpiração (E) mmol H₂O m⁻² s⁻¹ e a diferença de temperatura entre a folha e o ar (T_c-T_{ar}) em (°C) em obtidas por meio de imagens térmicas em diferentes níveis de reposição hídrica sendo eles: 150, 125, 100, 75, 50 e 25% da ETo para os dois ciclos de cultivos, AIC – Critério de Informação de Akaike e BIC – Critério de Informação Bayesiano e P – Valor - probabilidade de significância, área sombreada é o intervalo de confiança para 95% das observações.

A variação da temperatura do ar e da superfície foliar obtidas por meio de termografia apresentou correlações significativas em ambos os ciclos de cultivo quando relacionadas com as trocas gasosas, pois a detecção do estado da água da cultura depende da resposta

estomática da planta no balanço de energia entre planta atmosfera, e da espécie estudada (NELSON et al., 2018). Os resultados mostraram que A , g_s e E diminuíram significativamente com a diminuição de $T_c - T_a$; resultados semelhantes foram observados sob condições de estresse hídrico por diversos autores (GONZALEZ-DUGO; ZARCO-TEJADA; FERERES, 2014; YOUSEFZADEH NAJAFABADI; EHSANZADEH, 2017).

Os resultados da análise de regressão polinomial entre o CWSI e os níveis de reposição hídrica de 25, 50, 75, 100, 125 e 150% ETo em dois ciclos de cultivos são apresentados na Figura 9. Como esperado, houve relações negativas e significativas entre os níveis de reposição hídrica e o CWSI. Quanto menor a reposição de água nas plantas, maior o estresse hídrico, principalmente nos níveis 25 e 50% ETo.

As técnicas não destrutivas para mensuração do status de água nas culturas agrícolas são objeto de estudo em âmbito global, em virtude dos problemas causados pelo déficit hídrico. Os resultados de CWSI apresentados (Figura 9) ressaltam sua importância e utilidade para o monitoramento do estresse hídrico de culturas. Essa técnica é baseada no balanço energético da folha quando é aplicada uma situação de estresse hídrico. As plantas respondem com fechamento parcial ou total dos estômatos, reduzindo a condutância estomática, limitando a transpiração foliar e promovendo uma atenuação do processo de resfriamento evaporativo, resultando em valores mais altos de temperatura foliar (JONES, 2004; GARCÍA-TEJERO et al., 2017).

O índice de estresse hídrico da cultura (CWSI) é uma das técnicas que apresenta como base a termodinâmica, introduzidas primeiramente na década de 70 e 80 (JACKSON; REGINATO; IDSO, 1977; IDSO et al., 1980, 1981; JACKSON; KUSTAS; CHOUDHURY, 1988).

Figura 9. Relações entre CWSI e ETo para os dois ciclos de cultivos, P – Valor – probabilidade de significância, área sombreada é o intervalo de confiança para 95% das observações.

As análises de regressão entre o rendimento da cultura e os níveis de reposição de água com base na ETo mostraram-se significativos, o que explicou 62% e 80% para o primeiro e segundo ciclo da carqueja respectivamente (Figura 10 a; c). Ao considerar apenas os níveis de 25, 50, 75 e 100% ETo (Figura b; d), as relações apresentaram coeficiente de correlação $R^2=0,90$ e $0,96$ ($p<0,001$) para o primeiro e o segundo ciclo, respectivamente.

Para a carqueja, a média sazonal da produção de matéria seca explicou 62 e 80% das variações de produção para todas as parcelas de tratamento, respectivamente no primeiro e segundo ciclo (Figura 10 a e b). Houve diferença significativa entre os coeficientes de regressão para os métodos utilizados ($p<0,001$). Semelhantemente a diversas culturas agrícolas, o rendimento da carqueja está significativamente relacionado à variabilidade da reposição de água às plantas (MACHADO et al., 2005; O'SHAUGHNESSY et al., 2011; ÇOLAK et al., 2015; BELLEZONI et al., 2018).

Considerando apenas as reposições de 25, 50, 75 e 100% (Figura 10 b e d), a produção de matéria seca apresenta correlações significativas lineares e positivas da ordem de $R^2=0,90$ e $0,96$ ($p<0,001$), para primeiro e segundo ciclos. O estresse hídrico a que as plantas foram submetidas sugere que as reduções no rendimento da biomassa resultaram do fechamento dos estômatos, atividade fotoquímica reduzida durante toda a fase vegetativa da planta (TAIZ; ZEIGER, 2015). Alguns estudos ressaltam que o estresse oxidativo é uma das consequências mais importantes no agravamento das condições pelas quais a planta passa devido ao estresse hídrico. Como mecanismo para minimização desses problemas, as culturas utilizam sistemas antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos que são responsáveis pela diminuição da lesão oxidativa nos tecidos vegetais causada pelo estresse hídrico (AZHAR; REHMAN, 2018).

A redução nos níveis de reposição de água no solo leva ao fechamento dos estômatos, como pôde ser visto na Figura (7c). Como resultado, a absorção de CO_2 é marcadamente reduzida. Nesse sentido, o consumo de equivalentes de redução ($NADPH + H^+$) para a fixação de CO_2 via ciclo de Calvin diminui consideravelmente, gerando um excesso de oferta massiva de $NADPH^+ H^+$ (KLEINWÄCHTER; SELMAR, 2014). Como consequência, os processos metabólicos são empurrados para a síntese de compostos altamente reduzidos, como isoprenóides, fenóis ou alcalóides (JAMALI, 2012; KLEINWÄCHTER; SELMAR, 2014; CATOLA et al., 2016).

Com base nessas coerências, são dados impulsos a novas abordagens práticas para melhorar a qualidade do produto, por meio da aplicação deliberada de estresse hídrico durante o cultivo de plantas medicinais (CATOLA et al., 2016). No entanto, como o estresse hídrico concomitantemente leva a reduções maciças na produção de biomassa, uma ênfase especial é colocada na interferência desses efeitos relacionados ao estresse (AYAZ; KADIOGLU; TURGUT, 2000; OSUAGWU; EDEOGA, 2013; THAKUR; THAKUR, 2018). Resultados aqui encontrados corroboram com estudos realizados por diversos outros pesquisadores (LIBERATO et al., 2006; HOSSAIN et al., 2009; THAKUR; THAKUR, 2018).

Figura10. Relações entre biomassa seca e a reposição de água com base na reposição de 25, 50, 75, 100, 125 e 150% (a; c) ETo; e reposição de água de 25, 50, 75 e 100%, (b; d) para os dois ciclos de cultivos, AIC – Critério de Informação de Akaike e BIC – Critério de Informação Bayesiano e P – Valor - probabilidade de significância, área sombreada é o intervalo de confiança para 95% das observações.

2.4 Conclusões

A resposta da cultura da carqueja irrigada às variações do déficit hídrico descritas neste trabalho indicam que a dinâmica das trocas gasosas na carqueja é similar à encontrada em diversas culturas agrícolas; apresenta alta sensibilidade ao estresse hídrico, indicada pelas reduções significativas dos parâmetros das trocas gasosas (fotossíntese - A, Condutância estomática - g_s e Transpiração - E). Assim, o melhor desempenho foi obtido com o nível de reposição 100% ETo.

O uso da termografia pode fornecer uma medição confiável da temperatura do dossel, que pode ser usada com outros parâmetros para medição e quantificação do estresse hídrico, baseado na diferença da temperatura do dossel e do ar correlacionadas às condições fisiológicas impostas. Tais parâmetros mostraram boa correlação, apresentando-se como indicativo no manejo da cultura da carqueja.

Os resultados deste estudo comprovaram que os valores de CWSI calculados a partir de imagens de termografia por infravermelhos estão relacionados diretamente aos níveis de reposição hídrica da cultura. Essas informações são úteis para o diagnóstico do status hídrico da cultura auxiliando na tomada de decisão.

Agradecimentos

Este trabalho teve apoio financeiro da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processo nº 2012/50083-7 e USP - ETH-FAPESP:30761); do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (161398/2014-6); da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior 001); e do Departamento de Engenharia de Biosistemas - ESALQ/USP.

Referências

- AL-MEFLEH, N. K.; ABU SALAH, K. K.; ABANDEH, M. M. Influence of Water Quality and Harvest Times on Biomass Yield and Essential Oil of Lemon Verbena (*Aloysia triphylla*) under a Drip Irrigation System. **Journal of herbs, spices & medicinal plants**, v. 18, n. 2, p. 166–177, 2012.
- ALEMAN, C. C.; MARQUES, P. A. A. MANEJO E VIABILIDADE ECONÔMICA DA IRRIGAÇÃO NO CULTIVO DE *Calendula officinalis* L. p. 29–37, 2016.
- ALVARENGA, I. C. A.; LOPES, O. D.; PACHECO, F. V.; OLIVEIRA, F. G.; MARTINS, E. R. Fator de resposta do alecrim-pimenta a diferentes lâminas de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)**, v. 42, n. 4, p. 10–1590, 2012.
- ANDRIÃO, M. **Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de fenólicos totais em [baccharis trimera (less.) dc.] var. cpqba-1, sob diferentes podas no plantio.** 2010. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2010.

ARBUCKLE, J. G.; PROKOPY, L. S.; HAIGH, T.; HOBBS, J.; KNOOT, T.; KNUTSON, C.; LOY, A.; MASE, A. S.; MCGUIRE, J.; MORTON, L. W.; TYNDALL, J.; WIDHALM, M. Climate change beliefs, concerns, and attitudes toward adaptation and mitigation among farmers in the Midwestern United States. **Climatic Change**, v. 117, n. 4, p. 943–950, abr. 2013.

AVIVI, S.; SOEPARJONO, S.; ARIEZA RAMADHAN, R. ScienceDirect ScienceDirect Physiological Characters of Sugarcane after Flooding Stress. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 9, p. 31–39, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.119>>.

AYAZ, F. A.; KADIOGLU, A.; TURGUT, R. Water stress effects on the content of low molecular weight carbohydrates and phenolic acids in *Ctenanthe setosa* (Rosc.) Eichler. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 80, n. 2, p. 373–378, abr. 2000. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.4141/P99-005>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

AZHAR, M. T.; REHMAN, A. Overview on Effects of Water Stress on Cotton Plants and Productivity. **Biochemical, Physiological and Molecular Avenues for Combating Abiotic Stress Tolerance in Plants**, p. 297–316, jan. 2018.

BAHMANI, O.; SABZIPARVAR, A. A.; KHOSRAVI, R. Evaluation of yield, quality and crop water stress index of sugar beet under different irrigation regimes. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 17, n. 2, p. 571–578, 2016.

BEGUM, M. K.; ALAM, M. R.; ISLAM, M. S.; AREFIN, M. S. Effect of Water Stress on Physiological Characters and Juice Quality of Sugarcane. **Sugar Tech**, v. 14, n. 2, p. 161–167, 2012.

BELLEZONI, R. A.; SHARMA, D.; VILLELA, A. A.; PEREIRA JUNIOR, A. O. Water-energy-food nexus of sugarcane ethanol production in the state of Goiás, Brazil: An analysis with regional input-output matrix. **Biomass and Bioenergy**, v. 115, p. 108–119, ago. 2018. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953418301065>>. Acesso em: 2 maio. 2018.

BIANCHI, D.; GROSSI, D.; TINCANI, D. T. G.; SIMONE DI LORENZO, G.; BRANCADORO, L.; RUSTIONI, L. Multi-parameter characterization of water stress tolerance in *Vitis* hybrids for new rootstock selection. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 132, p. 333–340, nov. 2018.

BISWAL, B.; JOSHI, P. N.; RAVAL, M. K.; BISWAL, U. C. **Photosynthesis, a global sensor of environmental stress in green plants: Stress signalling and adaptation** Current Science Current Science Association, , 2011. .

BORELLA, J. C.; DUARTE, D. P.; NOVARETTI, A. A. G.; MENEZES JR., A.; FRANÇA, S. C.; RUFATO, C. B.; SANTOS, P. A. S.; VENEZIANI, R. C. S.; LOPES, N. P. Variabilidade sazonal do teor de saponinas de *Baccharis trimera* (Less.) DC (Carqueja) e isolamento de flavona. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 16, n. 4, p. 557–561, dez. 2006.

BORTOLO, D. P. G.; MARQUES, P. A. A.; PACHECO, A. C. Flavonoid content and yield in marigold plant (*Calendula officinalis* L.) cultivated under different irrigation depths. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 11, n. 4, p. 435–441, 2009.

BROCHOT, A.; GUILBOT, A.; HADDIOUI, L.; ROQUES, C. Antibacterial, antifungal, and antiviral effects of three essential oil blends. **MicrobiologyOpen**, n. October 2016, p. 1–6, 2017.

CATOLA, S.; MARINO, G.; EMILIANI, G.; HUSEYNOVA, T.; MUSAYEV, M.; AKPAROV, Z.; MASERTI, B. E. Physiological and metabolomic analysis of *Punica granatum* (L.) under drought stress. **Planta**, v. 243, n. 2, p. 441–449, 9 fev. 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00425-015-2414-1>>. Acesso em: 19 jun. 2019.

ÇOLAK, Y. B.; YAZAR, A.; ÇOLAK, İ.; AKÇA, H.; DURAKTEKIN, G. Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for Eggplant under Varying Irrigation Regimes Using Surface and Subsurface Drip Systems. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 4, p. 372–382, 2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210784315001059>>.

COTIČ, P.; KOLARIČ, D.; BOSILJKOV, V. B.; BOSILJKOV, V.; JAGLIČIĆ, Z. Determination of the applicability and limits of void and delamination detection in concrete structures using infrared thermography. **NDT and E International**, v. 74, p. 87–93, 2015. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0963869515000559/1-s2.0-S0963869515000559-main.pdf?_tid=b6014248-9e2c-11e7-b8ce-00000aacb360&acdnt=1505930234_e9b548f37e1d7014001587646d1ef6a3>. Acesso em: 20 set. 2017.

CRAFTS-BRANDNER, S. J.; SALVUCCI, M. E. Sensitivity of Photosynthesis in a C4 Plant, Maize, to Heat Stress. **PLANT PHYSIOLOGY**, v. 129, n. 4, p. 1773–1780, ago. 2002.

CRAPARO, A. C. W.; STEPPE, K.; VAN ASTEN, P. J. A.; LÄDERACH, P.; JASSOGNE, L. T. P.; GRAB, S. W. Application of thermography for monitoring stomatal conductance of *Coffea arabica* under different shading systems. **Science of the Total Environment**, v. 609, p. 755–763, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.158>>.

DE OLIVEIRA, R. N.; REHDER, V. L. G.; SANTOS OLIVEIRA, A. S.; JÚNIOR, Í. M.; DE CARVALHO, J. E.; DE RUIZ, A. L. T. G.; DE LOURDES SIERPE JERALDO, V.; LINHARES, A. X.; ALLEGRETTI, S. M. *Schistosoma mansoni*: In vitro schistosomicidal activity of essential oil of *Baccharis trimera* (less) DC. **Experimental Parasitology**, v. 132, n. 2, p. 135–143, out. 2012.

DEACON, E. L. Principles of environmental physics: J.L. Monteith. Edward Arnold, London, 1973, 241 pp., 107 illus., 15 tables, £6 (Paperback £3). **Agricultural Meteorology**, v. 13, n. 3, p. 429–430, out. 1974.

DEERY, D. M.; REBETZKE, G. J.; JIMENEZ-BERNI, J. A.; JAMES, R. A.; CONDON, A. G.; BOVILL, W. D.; HUTCHINSON, P.; SCARROW, J.; DAVY, R.; FURBANK, R. T. Methodology for High-Throughput Field Phenotyping of Canopy Temperature Using Airborne Thermography. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 1808, 2016. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27999580>>. Acesso em: 21 set. 2017.

DUTRA, R. C.; CAMPOS, M. M.; SANTOS, A. R. S.; CALIXTO, J. B. Medicinal plants in Brazil: Pharmacological studies, drug discovery, challenges and perspectives. **Pharmacological Research**, v. 112, p. 4–29, out. 2016.

EGEA, G.; PADILLA-DÍAZ, C. M.; MARTINEZ-GUANTER, J.; FERNÁNDEZ, J. E.; PÉREZ-RUIZ, M. Assessing a crop water stress index derived from aerial thermal imaging and infrared thermometry in super-high density olive orchards. **Agricultural Water Management**, v. 187, p. 210–221, 2017.

ELSAYED, S.; ELHOWEITY, M.; IBRAHIM, H. H.; DEWIR, Y. H.; MIGDADI, H. M.; SCHMIDHALTER, U. Thermal imaging and passive reflectance sensing to estimate the water status and grain yield of wheat under different irrigation regimes. **Agricultural Water Management**, v. 189, p. 98–110, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377417301701>>.

FERNÁNDEZ, J. E. Plant-based sensing to monitor water stress: Applicability to commercial orchards. **Agricultural Water Management**, v. 142, p. 99–109, ago. 2014.

GARCÍA-TEJERO, I. F.; DURÁN-ZUAZO, V. H.; MURIEL-FERNÁNDEZ, J. L.; JIMÉNEZ-BOCANEGRA, J. A. Linking canopy temperature and trunk diameter fluctuations with other physiological water status tools for water stress management in citrus orchards. **Functional Plant Biology**, v. 38, n. 2, p. 106–117, 2011.

GARCÍA-TEJERO, I. F.; GUTIÉRREZ-GORDILLO, S.; ORTEGA-ARÉVALO, C.; IGLESIAS-CONTRERAS, M.; MORENO, J. M.; SOUZA-FERREIRA, L.; DURÁN-ZUAZO, V. H. Thermal imaging to monitor the crop-water status in almonds by using the non-water stress baselines. **Scientia Horticulturae**, v. 238, p. 91–97, ago. 2018. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304423818302942>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

GARCÍA-TEJERO, I. F.; HERNÁNDEZ, A.; PADILLA-DÍAZ, C. M.; DIAZ-ESPEJO, A.; FERNÁNDEZ, J. E. Assessing plant water status in a hedgerow olive orchard from thermography at plant level. **Agricultural Water Management**, v. 188, p. 50–60, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.004>>.

GERHARDS, M.; ROCK, G.; SCHLERF, M.; UDELHOVEN, T. Water stress detection in potato plants using leaf temperature, emissivity, and reflectance. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 53, p. 27–39, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2016.08.004>>.

GONZALEZ-DUGO, V.; ZARCO-TEJADA, P. J.; FERERES, E. Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 198–199, p. 94–104, 1 nov. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192314001841#bib0125>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

GRANT, O. M.; DAVIES, M. J.; JAMES, C. M.; JOHNSON, A. W.; LEINONEN, I.; SIMPSON, D. W. Thermal imaging and carbon isotope composition indicate variation amongst strawberry (*Fragaria?ananassa*) cultivars in stomatal conductance and water use efficiency. **Environmental and Experimental Botany**, v. 76, p. 7–15, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.09.013>>.

HOSSAIN, Z.; LÓPEZ-CLIMENT, M. F.; ARBONA, V.; PÉREZ-CLEMENTE, R. M.; GÓMEZ-CADENAS, A. Modulation of the antioxidant system in citrus under waterlogging and subsequent drainage. **Journal of Plant Physiology**, v. 166, n. 13, p. 1391–1404, 1 set. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161709001011?via%3Dihub>>. Acesso em: 19 jun. 2019.

HUSSAIN, S. S.; ALI, M.; AHMAD, M.; SIDDIQUE, K. H. M. Polyamines: Natural and engineered abiotic and biotic stress tolerance in plants. **Biotechnology Advances**, v. 29, n. 3, p. 300–311, 2011.

IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J. J.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L. Normalizing the stress-degree-day parameter from environmental variability. **Agricultural Meteorology**, v. 24, p. 45–55, 1981.

IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L.; WALKER, G. K.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J. A generalization of the stress-degree-day concept of yield prediction to accommodate a diversity of crops. **Agricultural Meteorology**, v. 21, n. 3, p. 205–211, 1980.

INOUE, Y.; KIMBALL, B. A.; JACKSON, R. D.; PINTER JR, P. J.; REGINATO, R. J. REMOTE ESTIMATION OF LEAF TRANSPIRATION RATE AND STOMATAL RESISTANCE BASED ON INFRARED THERMOMETRY. **Elsevier Science Publishers B.V**, v. 51, p. 21–33, 1990. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/0168192390900399/1-s2.0-0168192390900399-main.pdf?_tid=efb962d4-9f00-11e7-bea9-00000aacb35f&acdnat=1506021383_ff8742ee081c1a095e2203b294aa8d82>. Acesso em: 21 set. 2017.

JACKSON, R. D.; KUSTAS, W. P.; CHOUDHURY, B. J. A reexamination of the crop water stress index. **Irrigation Science**, v. 9, n. 4, p. 309–317, 1988.

JACKSON, R. D.; REGINATO, R. J.; IDSO, S. B. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. **Water Resources Research**, v. 13, n. 3, p. 651–656, jun. 1977. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/WR013i003p00651>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

JAMALI, M. M. Investigate the effect of drought stress and different amount of chemical fertilizers on some physiological characteristics of coriander (*Coriandrum sativum* L.). **International journal of Agronomy and Plant Production**, v. 3, p. 585–589, 2012.

JANKA, E.; KÖRNER, O.; ROSENQVIST, E.; OTTOSEN, C. O. Using the quantum yields of photosystem II and the rate of net photosynthesis to monitor high irradiance and temperature stress in chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora*). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 90, p. 14–22, 2015.

JANUÁRIO, A. H.; SANTOS, S. L.; MARCUSSI, S.; MAZZI, M. V.; PIETRO, R. C. L. R.; SATO, D. N.; ELLENA, J.; SAMPAIO, S. V.; FRANÇA, S. C.; SOARES, A. M. Neo-clerodane diterpenoid, a new metalloprotease snake venom inhibitor from *Baccharis trimera* (Asteraceae): anti-proteolytic and anti-hemorrhagic properties. **Chemico-Biological Interactions**, v. 150, n. 3, p. 243–251, dez. 2004.

JONES, H. G. Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. **Plant, Cell and Environment**, v. 22, n. 9, p. 1043–1055, 1999.

JONES, H. G. Application of Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Physiology and Ecophysiology. In: [s.l: s.n.]p. 107–163.

KHANAL, S.; FULTON, J.; SHEARER, S. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 139, p. 22–32, jun. 2017.

KHORSANDI, A.; HEMMAT, A.; MIREEI, S. A.; AMIRFATTAHI, R.; EHSANZADEH, P. Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions. **Agricultural Water Management**, v. 204, p. 222–233, maio 2018. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377418303573>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

KLEINWÄCHTER, M.; SELMAR, D. Influencing the Product Quality by Applying Drought Stress During the Cultivation of Medicinal Plants. In: **Physiological Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants Under Changing Environment**. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 57–73.

KLEM, K.; ZÁHORA, J.; ZEMEK, F.; TRUNDA, P.; TŮMA, I.; NOVOTNÁ, K.; HODAŇOVÁ, P.; RAPANTOVÁ, B.; HANUŠ, J.; VAVŘÍKOVÁ, J.; HOLUB, P. Interactive effects of water deficit and nitrogen nutrition on winter wheat. Remote sensing methods for their detection. **Agricultural Water Management**, v. 210, p. 171–184, nov. 2018.

LAWLOR, D. W.; TEZARA, W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. **Annals of botany**, v. 103, n. 4, p. 561–79, fev. 2009.

LIBERATO, M. A. R.; GONÇALVES, J. F. de C.; CHEVREUIL, L. R.; NINA JUNIOR, A. da R.; FERNANDES, A. V.; SANTOS JUNIOR, U. M. dos. Leaf water potential, gas exchange and chlorophyll a fluorescence in acariquara seedlings (*Minquartia guianensis* Aubl.) under water stress and recovery. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, n. 2, p. 315–323, jun. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1677-04202006000200008&lng=en&tlng=en>. Acesso em: 19 jun. 2019.

LIMA, R. S. N.; GARCÍA-TEJERO, I.; LOPES, T. S.; COSTA, J. M.; VAZ, M.; DURÁN-ZUAZO, V. H.; CHAVES, M.; GLENN, D. M.; CAMPOSTRINI, E. Linking thermal imaging to physiological indicators in *Carica papaya* L. under different watering regimes. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 148–157, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.017>>.

LIU, J.; BASNAYAKE, J.; JACKSON, P. A.; CHEN, X.; ZHAO, J.; ZHAO, P.; YANG, L.; BAI, Y.; XIA, H.; ZAN, F.; QIN, W.; YANG, K.; YAO, L.; ZHAO, L.; ZHU, J.; LAKSHMANAN, P.; ZHAO, X.; FAN, Y. Growth and yield of sugarcane genotypes are strongly correlated across irrigated and rainfed environments. **Field Crops Research**, v. 196, p. 418–425, 2016.

LYNN, B. H.; CARLSON, T. N. A stomatal resistance model illustrating plant vs. external control of transpiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 52, n. 1, p. 5–43, 1990.

MACHADO, E. C.; SCHMIDT, P. T.; MEDINA, C. L.; RIBEIRO, E. R. V. Respostas da fotossíntese de três espécies de citros a fatores ambientais. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 40, n. 12, p. 1161–1170, 2005.

MAES, W. H.; ACHTEN, W. M. J.; REUBENS, B.; MUYS, B. Monitoring stomatal conductance of *Jatropha curcas* seedlings under different levels of water shortage with infrared thermography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 5, p. 554–564, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.12.011>>.

MANGUS, D. L.; SHARDA, A.; ZHANG, N. Development and evaluation of thermal infrared imaging system for high spatial and temporal resolution crop water stress monitoring of corn within a greenhouse. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 121, p. 149–159, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2015.12.007>>.

MARCHESE, J. A.; FIGUEIRA, G. M. O uso de tecnologias pr?? e p??s-colheita e boas pr??ticas agr??colas na produ??o de plantas medicinais e arom??ticas. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 7, n. 3, p. 86–96, 2005.

MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, E. C.; RIBEIRO, R. V. Photosynthetic limitations imposed by self-shading in field-grown sugarcane varieties. **Field Crops Research**, v. 155, p. 30–37, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.09.025>>.

MATHUR, S.; AGRAWAL, D. Photosynthesis: Response to high temperature stress. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 137, p. 116–126, ago. 2014.

MEIRA, M. R.; MELO, M. T. P. de; MARTINS, E. R.; PINTO, M. J. da S.; SANTANA, C. S. Crescimento vegetativo, produ??o de fitomassa e de ?leo essencial de *Melissa officinalis* L. sob diferentes l??minas de irriga??o. **Ci??ncia Rural**, v. 43, n. 5, p. 779–785, 2013a.

MEIRA, M. R.; MELO, M. T. P. de; MARTINS, E. R.; PINTO, M. J. da S.; SANTANA, C. S. Crescimento vegetativo, produ??o de fitomassa e de ?leo essencial de *Melissa officinalis* L. sob diferentes l??minas de irriga??o. **Ci??ncia Rural**, v. 43, n. 5, p. 779–785, 9 abr. 2013b. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782013000500004&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 18 jun. 2019.

MINTEGUIAGA, M.; MERCADO, M. I.; PONESSA, G. I.; CATAL??N, C. A. N.; DELLACASSA, E. Morphoanatomy and essential oil analysis of *Baccharis trimera* (Less.) DC. (Asteraceae) from Uruguay. **Industrial Crops and Products**, v. 112, p. 488–498, fev. 2018.

MORENO PIZANI, M. A. **Manejo da irriga??o e produtividade da ?gua na cultura da carqueja (*baccharis crispa spreng* .)**. 2017. Universidade de S??o Paulo, 2017.

NELSON, W. C. D.; HOFFMANN, M. P.; VADEZ, V.; ROETTER, R. P.; WHITBREAD, A. M. Testing pearl millet and cowpea intercropping systems under high temperatures. **Field Crops Research**, v. 217, p. 150–166, mar. 2018.

NILES, M. T.; LUBELL, M.; BROWN, M. How limiting factors drive agricultural adaptation to climate change. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 200, p. 178–185, fev. 2015.

NOWAK, M.; KLEINW??CHTER, M.; MANDERSCHIED, R.; WEIGEL, H. J.; SELMAR, D. Drought stress increases the accumulation of monoterpenes in sage (*Salvia officinalis*), an effect that is compensated by elevated carbon dioxide concentration **Journal of Applied Botany and Food Quality**, 2010. .

O'SHAUGHNESSY, S. A.; EVETT, S. R.; COLAIZZI, P. D.; HOWELL, T. A. Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 10, p. 1523–1535, 2011.

OSROOSH, Y.; TROY PETERS, R.; CAMPBELL, C. S.; ZHANG, Q. Automatic irrigation scheduling of apple trees using theoretical crop water stress index with an innovative dynamic threshold. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 118, p. 193–203, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.006>>.

OSUAGWU, G. G. E.; EDEOGA, H. O. The effect of water stress (drought) on the proximate composition of the leaves of *Ocimum gratissimum* (L) and *Gongronema latifolium* (Benth)Int. **J. Med. Arom. Plants**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.openaccessscience.com>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

PACHECO, A. C.; CAMARGO, P. R.; SOUZA, C. e G. M. Deficiência hídrica e aplicação de ABA nas trocas gasosas e no acúmulo de flavonoides em calêndula (*Calendula officinalis* L.). **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 33, n. 2, p. 275–281, 2011.

PEYVANDI, M. Effect of drought interactions with ascorbate on some biochemical parameters and antioxidant enzymes activities in *Dracocephalum moldavica* L. **Article in World Applied Sciences Journal**, 2013. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/267036361>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

PICHI, D. G.; ALMEIDA, A. C. S.; JAMAMI, N.; SALVI JÚNIOR, A.; SACRAMENTO, L. V. S. Cálcio e fitorreguladores no desenvolvimento e estado nutricional de *Mentha spicata* x *suaveolens* cultivada em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 14, n. 3, p. 446–452, 2012.

PRAVUSCHI, P. R.; MARQUES, P. A. A.; RIGOLIN, B. H. M.; SANTOS, A. C. P. Efeito de diferentes lâminas de irrigação na produção de óleo essencial do manjeriço (*Ocimum basilicum* L.)-doi: 10.4025/actasciagron. v32i4. 3160. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 4, p. 687–693, 2010.

RAY D. JACKSON. Canopy Temperature and Crop Water Stress. **Advances in Irrigation**, v. 1, p. 43–85, 1 jan. 1982. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780120243013500095>>. Acesso em: 21 set. 2017.

RIOBA, N. B.; ITULYA, F. M.; SAIDI, M.; DUDAI, N.; BERNSTEIN, N. Effects of nitrogen, phosphorus and irrigation frequency on essential oil content and composition of sage (*Salvia officinalis* L.). **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**, v. 2, n. 1, p. 21–29, 2015.

RITARI, A.; STRÖMMER, E. Determining the temperature and water vapour pressure gradient of the ambient air using a reversing two-sensor system. An application of energy balance measurements in a clearfelled and prescribed burnt area. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 35, n. 1–4, p. 255–265, out. 1985.

ROMERO-ROMERO, J. L.; INOSTROZA-BLANCHETEAU, C.; ORELLANA, D.; AQUEA, F.; REYES-DÍAZ, M.; GIL, P. M.; MATTE, J. P.; ARCE-JOHNSON, P. Stomata regulation by tissue-specific expression of the *Citrus sinensis* MYB61 transcription factor improves water-use efficiency in *Arabidopsis*. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 130, p. 54–60, set. 2018.

KHOSH-KHUI, M.; ASHIRI, F.; SAHARKHIZ, M. J. Effects of Irrigation Regimes on Antioxidant Activity and Total Phenolic Content of Thyme (*Thymus vulgaris* L.). **Medicinal & Aromatic Plants**, v. 01, n. 07, 17 out. 2012. Disponível em: <<https://www.omicsgroup.org/journals/effects-of-irrigation-regimes-on-antioxidant-activity-and-total-phenolic-content-of-thyme-thymus-vulgaris-l-2167-0412.1000114.php?aid=9723>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

SANTESTEBAN, L. G.; DI GENNARO, S. F.; HERRERO-LANGREO, A.; MIRANDA, C.; ROYO, J. B.; MATESE, A. High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard. **Agricultural Water Management**, v. 183, p. 49–59, 31 mar. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377416303201>>. Acesso em: 2 maio. 2018.

SINGH, M. Effects of plant spacing, fertilizer, modified urea material and irrigation regime on herbage, oil yield and oil quality of rosemary in semi-arid tropical conditions. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v. 79, n. 3, p. 411–415, 2004.

SOUZA, M. R. M.; PEREIRA, R. G. F.; FONSECA, M. C. M. Comercialização de plantas medicinais no contexto da cadeia produtiva em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 14, n. spe, p. 242–245, 2012.

TAGHVAEIAN, S.; CH??VEZ, J. L.; HANSEN, N. C. Infrared thermometry to estimate crop water stress index and water use of irrigated maize in northeastern colorado. **Remote Sensing**, v. 4, n. 11, p. 3619–3637, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology (sixth edition)**. Universitat Jaume I, 2015.

THAKUR, A.; THAKUR, C. L. Evaluation of four medicinal herb species under conditions of water-deficit stress. **Indian Journal of Plant Physiology**, v. 23, n. 3, p. 459–466, 11 set. 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s40502-018-0387-3>>. Acesso em: 19 jun. 2019.

TOMBESI, S.; CINCERA, I.; FRIONI, T.; UGHINI, V.; GATTI, M.; PALLIOTTI, A.; PONI, S. Relationship among night temperature, carbohydrate translocation and inhibition of grapevine leaf photosynthesis. **Environmental and Experimental Botany**, v. 157, p. 293–298, jan. 2019.

VAN WYK, A. S.; PRINSLOO, G. Medicinal plant harvesting, sustainability and cultivation in

South Africa. **Biological Conservation**, v. 227, p. 335–342, nov. 2018.

VAZ, A. P. A.; JORGE, M. H. A. **CARQUEJA DESCRIÇÃO BOTÂNICA**.

VEYSI, S.; NASERI, A. A.; HAMZEH, S.; BARTHOLOMEUS, H. A satellite based crop water stress index for irrigation scheduling in sugarcane fields. **Agricultural Water Management**, v. 189, p. 70–86, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.016>>.

VINCENT, C.; SCHAFFER, B.; ROWLAND, D. Water-deficit priming of papaya reduces high-light stress through oxidation avoidance rather than anti-oxidant activity. **Environmental and Experimental Botany**, v. 156, p. 106–119, dez. 2018.

WANG, D.; GARTUNG, J. Infrared canopy temperature of early-ripening peach trees under postharvest deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 11, p. 1787–1794, 2010.

YOUSEFZADEH NAJAFABADI, M.; EHSANZADEH, P. Photosynthetic and antioxidative upregulation in drought-stressed sesame (*Sesamum indicum* L.) subjected to foliar-applied salicylic acid. **Photosynthetica**, v. 55, n. 4, p. 611–622, dez. 2017.

3 INFLUÊNCIA DOS NÍVEIS DE MANEJO DE IRRIGAÇÃO NAS QUESTÕES FISIOLÓGICAS DE TROCAS GASOSAS EM CAFEIEIRO (*Coffea arabica* L.)

Resumo

A crescente demanda global por água, vem aumentando gradativamente a necessidade por sua utilização mais eficiente. A temperatura das folhas pode fornecer informações sob a condição hídrica da planta e diagnosticar os problemas relacionados ao estresse das plantas no campo. Estudos relatam que cerca de 97% da água captada pelas plantas é perdida para a atmosfera, principalmente pela transpiração através dos estômatos localizado nas folhas. Esse trabalho teve como objetivo estudar os impactos do estresse abiótico do tipo hídrico sob a produtividade da água e as relações de trocas gasosas do cafeeiro com a atmosfera. O experimento foi realizado em casa de vegetação na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. Os tratamentos consistiram 4 níveis de reposição hídrica em quatro período de estudos, com base na umidade do solo mantida na capacidade de campo (θ_{cc}) denominado de nível 100%; assim, os níveis foram estabelecidos em 40, 70, 100 e 130% θ_{cc} . As trocas gasosas (H_2O e CO_2) realizadas pelas plantas foram medidas com sistema de analisador de gases por infravermelho; o potencial de água na folha foi coletado com câmara de pressão tipo *Scholander*. O efeito do estresse hídrico foi mesurado por meio da determinação do *Crop Water Stress Index* (CWSI), calculado com base em imagens térmicas de câmara infravermelha. Foram realizadas análises de correlação e análise de redundância (RDA) entre todos os parâmetros estudadas, a fim de identificar as respostas da planta às condições de manejo adotado. Os resultados mostraram que o café sob estresse hídrico apresenta reduções nas taxas de assimilação de CO_2 ; paralelamente houve reduções na condutância estomática e nas taxas de transpiração. O CWSI, embora concebido como um índice de estresse hídrico, guarda uma boa relação com os parâmetros fisiológicos do café. Desta forma, este índice representa uma importante ferramenta para a gestão da água, podendo ser utilizado para o monitoramento do estresse hídrico pelo cafeeiro, indicando que essa cultura pode ser manejada na condição de irrigação sobre déficit, visando otimizar recursos hídricos.

Palavras-chave: CWSI; Condutância Estomática; Potencial de Água na Folha; Taxa de Fotossíntese; Manejo da Irrigação no Cafeeiro

Abstract

The increasing global demand for water has been gradually increasing the need for more efficient water use in agriculture. Leaf temperature can provide information under the water condition of the plant and diagnose problems related to plant stress in the field. Studies report that about 97% of the water captured by plants is lost to atmosphere, mainly by transpiration through the stomata located in the leaves. The objective of this work was to study the impacts of the abiotic stress of the water type under the water productivity and the gas exchange relations of coffee trees with atmosphere. The experiment was carried out in a greenhouse at the "Luiz de Queiroz" College of Agriculture, University of São Paulo, São Paulo, Brazil. The treatments consisted of 4 levels of water replacement in four study periods, based on the soil moisture maintained at the field capacity (θ_{cc}) denominated at 100% level,

thus, the levels were established at 40, 70, 100 and 130% θ_{cc} . The gas exchanges (H_2O and CO_2) carried out by the plants were measured with an infrared gas analyzer system; the water potential in the leaf was collected with Scholander type pressure camera. The effect of water stress was measured by determining the *Crop Water Stress Index* (CWSI), calculated on the basis of thermal infrared camera images. Correlation analyzes and redundancy analysis (RDA) were carried out between all the parameters, in order to identify plant responses and the management conditions adopted. The results showed that coffee under water stress presents reductions in CO_2 assimilation rates in parallel, there were reductions in stomatal conductance and in transpiration rates. The CWSI, although conceived as an index of water stress, presents a good relationship with the physiological parameters of coffee. In this way, this index represents an important tool for water management, and can be used to monitor water stress by coffee, indicating that this crop can be managed in the condition of irrigation on deficit in order to optimize water resources and assuring high quality to prime coffee (gourmet).

Keywords: CWSI; Stomatal conductance; Leaf water potential; Photosynthesis rate; Irrigation management in coffee

3.1 Introdução

O café é a terceira bebida mais popular do mundo, além da água e do chá, e é consumida há séculos em diversos países no mundo inteiro (MAUAD et al., 2017). O café arábica é originário das florestas tropicais nas terras altas da Etiópia, região central da África, e ainda hoje faz parte da vegetação natural do local (AL-ABDULKADER et al., 2018). Sua produção constitui a principal atividade econômica em muitos países da África e da América Latina (TOUNEKTI et al., 2018a). Entre as 90 espécies conhecidas do gênero *Coffea*, *Coffea arabica* L. (café Arábica) e *Coffea canephora* L. (café Robusta) respondem por 65% e 35%, respectivamente, da produção mundial de café (INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION, 2018).

Na produção total de café produzido, os maiores países exportadores são: o Brasil que atinge 32% da produção global, seguido pelo Vietnã (18%), Colômbia, Indonésia e Etiópia que representam 9%, 7% e 5%, respectivamente, enquanto a Índia e Uganda produzem aproximadamente 4% e 3%, por esta ordem (INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION, 2018). Vale ressaltar que os 32% produzidos pelo Brasil correspondem a uma área de 2,23 milhões de hectares dos quais, 1,9 milhão de hectares (85%) estão em produção e 332 mil hectares (15%) em formação (CONAB, 2017); em torno de 10% dessa área é irrigada (O TAVARES et al., 2017).

A disponibilidade de água afeta crescimento e produção de plantas, principalmente em regiões áridas e semiáridas, onde as plantas são frequentemente submetidas a períodos de seca (DA SILVA BARROS et al., 2018). O déficit hídrico é um dos principais fatores abióticos que limitam a produtividade das culturas nos trópicos semiáridos, tais como a produção de grãos, que diminuem significativamente (FISCHER; REDDY; RAO, 2016). O sucesso da cafeicultura no país é determinado pela água, pois influencia em toda a fenologia da planta (SILVA et al., 2019). O estresse hídrico pode causar prejuízos acima de 80% das perdas totais na produção agrícola, afetando até mesmo a dinâmica de comercialização do produto (COSTA et al., 2019); além disso, esses efeitos poderão ser intensificados em virtude das mudanças climáticas que provavelmente causará maiores restrições sobre os recursos hídricos, com eventos inesperados de seca ou precipitação reduzida, diminuindo o rendimento das culturas, tornando as secas ainda mais severas (PADAKANDLA, 2016). Portanto, a segurança alimentar global sustentável, dependente do desenvolvimento de culturas com melhor adaptação a ambientes com escassos recursos hídricos.

A ocorrência de respostas morfológicas e fisiológicas, que podem levar a alguma adaptação ao estresse hídrico, variam consideravelmente entre as espécies. Sob a seca, as trocas gasosas das plantas são reduzidas, o que leva a menor acúmulo de biomassa e rendimento de grãos; assim, as estratégias das plantas sob déficit hídrico são limitadas e giram em torno da necessidade de usar água de maneira eficiente, maximizando a captura de água do perfil do solo para garantir que a água esteja disponível para o período de enchimento de grãos (SOUZA et al., 2004; KUSAKA; LALUSIN; FUJIMURA, 2005; KHOLOVÁ et al., 2010; VADEZ et al., 2013; NELSON et al., 2018).

Condições ambientais adversas desencadeiam uma ampla gama de respostas nas plantas, desde a expressão gênica alterada (KRASENSKY; JONAK, 2012), metabolismo celular até mudanças nas taxas de crescimento e produtividade das culturas como denominador comum dessas condições (GUEDES et al., 2018). Como a seca é o estresse ambiental mais importante na agricultura devido aos prejuízos fisiológicos e econômicos, esses eventos devem ser acentuados pela mudança climática. Entender as respostas das plantas a esse tipo de estresse é importante para aumentar a produtividade das culturas e usar de forma sustentável os recursos hídricos disponíveis (KRASENSKY; JONAK, 2012; TOUNEKTİ et al., 2018a).

A característica de resistência a seca reflete sua capacidade de limitar o impacto no rendimento metabólico e consequentemente econômico dessas mudanças na produção agrícola (VADEZ et al., 2013; FITA et al., 2015). Vale ressaltar que essa capacidade dependerá da fase de desenvolvimento afetada pelo déficit hídrico, assim como da intensidade e duração da seca (WINKEL; RENNO; PAYNE, 1997; TAIZ; ZEIGER, 2015). A maior parte do café mundial tem sido cultivada em regiões propensas à seca, até impróprias para seu cultivo e ótimo crescimento e produção (DAMATTA et al., 2006a; TOUNEKTİ et al., 2018a).

Os cafeeiros são sensíveis às mudanças do microclima e são influenciados por pequenas alterações no sistema de produção que podem resultar em menores rendimentos de grãos de café (SAKAI et al., 2015). Entre as variáveis climáticas que afetam o crescimento e a produção de café arábica, destacam-se a temperatura, a luz e a disponibilidade hídrica como os mais relevantes fatores (BENTO; DE CAMARGO; CAMARGO, 2010).

Todos os processos fisiológicos da célula são diretamente ou indiretamente afetados pelo suprimento de água, ou seja, as atividades metabólicas e o crescimento celular estão relacionados aos teores de água do protoplasma (TAIZ; ZEIGER, 2015). As trocas gasosas estão (planta – ambiente) correlacionadas com os fatores temperatura da folha e potencial de água na folha, que por sua vez são influenciadas pelas condições ambientais: temperatura do ar, velocidade do vento, umidade e irradiação incidente, diferenças entre a temperatura do ar e a temperatura da folha ($T_a - T_{leaf}$) vem mostrando-se muito eficiente na identificação do estresse na planta (GONZALEZ-DUGO; ZARCO-TEJADA; FERERES, 2014a; LIMA et al., 2016; CRAPARO et al., 2017a).

Com necessidades de alternativas para facilitar a identificação do estresse hídrico, vários índices foram criados, para estabelecer de forma numérica o quanto a falta de água pode afetar uma determinada cultura (IDSO et al., 1980, 1981; JONES, 2004; GONZALEZ-DUGO; ZARCO-TEJADA; FERERES, 2014a). No entanto, as culturas comerciais apresentam diversas características que impedem que os índices criados para essa finalidade sejam usados de forma dinâmica pelos produtores devido a especificidades de cada método. O Índice de Estresse Hídrico da Cultura (Crop Water Stress Index – CWSI), desenvolvido por Ray D. Jackson, (1982) é um método teórico baseado na relação entre a evapotranspiração real e a potencial, e na água disponível no solo. Nesse caso, são valores estimados para culturas generalizadas, nos quais o coeficiente de cultura - K_c não é empregado.

Como a temperatura da folha é influenciada por condições ambientais, o CWSI relaciona a temperatura observada com as temperaturas mínima (não estressada) e a temperatura máxima (não transpirante) de uma cultura de referência sob condições ambientais similares (IDSO et al., 1980; JACKSON et al., 1981; JACKSON; KUSTAS; CHOUDHURY, 1988; GONZALEZ-DUGO; ZARCO-TEJADA; FERERES, 2014b). Assim, quando as plantas estão sob estresse hídrico, há fechamento estomático, que interrompe parte da perda de calor latente, acarretando aumento da temperatura foliar em relação ao ambiente (RAY D. JACKSON, 1982; ÇOLAK et al., 2015; GARCIA-TEJERO et al., 2017).

Com isso foi levantada a hipótese de que a temperatura foliar oriunda das imagens térmicas podem servir como ferramenta alternativa para monitorar o status hídrico das plantas, especialmente quando esta cultura é submetida a estratégias de irrigação por déficit. Os objetivos deste trabalho foram, portanto, investigar o impacto do déficit hídrico nas relações hídricas na cultura do cafeeiro (i), averiguar as correlações entre as trocas gasosas e as respostas térmicas da cultura submetidas a níveis de reposição hídrica (ii), e estabelecer as melhores condições de manejo hídrico para a fim de minimizar os impactos causados pelo estresse hídrico.

3.2. Material e métodos

Características da cultura e local de condução do experimento

O estudo realizado foi proveniente de uma parceria com o trabalho de Costa, (2016). O experimento foi realizado na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil (22°42'45" S; 47°37'54" W, 543 m de altitude em relação ao nível do mar). As plantas de café foram cultivadas em casa de vegetação com área total de 160 m², em 56 vasos (com capacidade de 0,50 m³) de concreto com dimensões de 0,92 x 1,08 x 0,65 m, de largura, comprimento e profundidade, respectivamente. Os vasos foram distribuídos equidistantes com 0,5 m entre vasos e 1,0 m entre linhas. O cultivo foi realizado em um Nitossolo Vermelho Eutrófico (Udox).

O plantio foi realizado no final do ano de 2012, sendo as mudas da espécie *Coffea arabica* variedade IAC Catuaí Vermelho 144. As mudas foram adquiridas em um viveiro certificado quanto a qualidade e a sanidade, com aproximadamente 20 cm de altura. A condução do experimento ocorreu com o cafeeiro no ano de 2015.

Delineamento estatístico das condições experimentais

A avaliação das plantas foi realizada no decorrer de cada período. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, apresentando 4 blocos e 4 níveis de reposição hídrica. O experimento foi realizado em quatro períodos sendo eles: Período 1 (30/03 à 24/04); período 2 (07/06 à 02/07); período 3 (17/08 à 11/09); período 4 (10/10 à 04/11) de 2015.

Para as análises de redundância (RDA) foram realizados testes de Monte Carlo baseado em 499 permutações aleatórias para cada período, produzindo os valores de η^2 e Wilk's lambda (%), estimando assim a significância de cada correlação (Baretta et al., 2008).

Para os dados experimentais, os pressupostos de normalidade de variância foram testados usando o teste de Shapiro e Wilk (1965) e de homocedasticidade pelo teste de Levene. As correlações foram realizadas por meio de (Correlações de Pearson). A comparação das médias foi realizada pelo teste de Tukey, em nível de significância de 5%. As análises foram realizadas com o software R (R Core Team 2018), v.3.3.4, utilizando os pacotes ExpDes.pt (FERREIRA et al., 2018) e ggplot2 (WICKHAM, 2009). A análise de redundância – RDA foram realizados com auxílio do software Canoco® for Windows v. 4.5.

Características físicas do solo e condições de fertilidade

O solo foi fertilizado de acordo com as recomendações do Boletim 100 - Instituto Agrônomo de Campinas, para a cultura do café no Brasil (Teixeira et al., 1997). As adubações foram realizadas via cobertura e fertirrigação, sendo as mesmas divididas em 4 aplicações.

Amostras indeformadas foram coletadas para a obtenção das curvas de retenção de água no solo (CRA), por meio de mesa de tensão (-1, -2, -4 e -6 kPa) e extratores de “Richards” com placas porosas (-10, -30, -50, -100, -500, -1000 e -1500 kPa). Foram retiradas em três profundidades, 10, 30 e 50 cm, representando as camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente, assim como determinações da densidade global (Ds), densidade das partículas (Dp) e porosidade total (α) do solo (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização físico-hídrica do solo usado no experimento

Prof.	θ_{cc}	θ_{pmp}	CAD	Ds	Dp	α	Frações granulométricas (%)		
cm	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$		mm	g cm^{-3}		%	Areia	Silte	Argila
0-20	0,321	0,205	23,2	1,28	2,70	52,6	31,3	14,8	53,9
20-40	0,333	0,207	25,2	1,27	2,70	53,0	31,0	16,1	52,9
40-60	0,340	0,218	24,4	1,31	2,71	51,7	30,1	17,3	52,6

* A caracterização física do solo foi realizada de acordo com os métodos padrões adotados para solos tropicais (Raij et al., 2001). Resumidamente, Areia, silte e Argila pelo método do Bouyoucos Hydrometer e θ_{cc} , θ_{PWP} pelo método do extrator de Richards.

Irrigação e características de manejo da cultura

O sistema de irrigação adotado na área experimental foi o gotejamento, utilizando tubo gotejador com emissor autocompensante. Cada caixa possuía dois gotejadores com vazão de 8 L h^{-1} . Esta vazão era dividida em quatro pontos da caixa por mini-estacas.

O manejo da irrigação baseou-se no monitoramento do potencial mátrico do solo; para isso, três baterias (3 repetições) compostas por três tensiômetros nas parcelas de referência a profundidades de 0,10 m, 0,30 m e 0,50 m, representando assim às camadas de 0,0-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente. Deste modo, o manejo da irrigação foi diferenciado, em função da demanda hídrica requerida por cada.

O nível de reposição hídrica 100 θ_{cc} foi estimada somando-se as lâminas de água necessárias para elevar a umidade do solo até capacidade de campo em cada uma das seguintes camadas 0,0-0,2 m; 0,2-0,4 m; e 0,4-0,6 m. As demais reposições hídricas aplicadas ao experimento: 40, 70 e 130% θ_{cc} foram calculadas como frações da reposição 100% θ_{cc} .

As imposições desses tratamentos foram realizadas em quatro períodos com duração de 25 dias cada um. Essa duração da aplicação dos tratamentos foi definida a partir de um experimento prévio que mostrou ser este um tempo suficiente para haver alterações na temperatura e no potencial de água da folha e ao mesmo tempo não comprometer a cultura (queda de folhas) que seria utilizada em avaliações futuras. As avaliações foram realizadas em plantas adultas (3 anos de idade) da espécie *Coffea arabica* e da variedade Catuaí Vermelho IAC 144. Após o período de aplicação dos tratamentos, todas as plantas receberam irrigação plena. No período anterior à aplicação dos tratamentos (0 a 3 anos de idade) a cultura foi manejada recebendo irrigação plena.

Após as leituras de tensão, os valores coletados foram transformados em potencial matricial (Ψ_m) (equação 1) da água no solo e, em seguida, a estimativa da umidade foi realizada por meio do modelo proposto por Van Genuchten (1980) (equação 2).

$$\Psi_m = L_t - h_c \quad (1)$$

Em que: Ψ_m - potencial matricial da água no solo (kPa); L_t - leitura do tensiômetro ou tensão da água no solo (kPa); h_c - pressão equivalente à altura da coluna d'água no tensiômetro (kPa);

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

Em que: θ (Ψ_m) - umidade volumétrica em função do potencial mátrico, em $m^3 m^{-3}$; θ_r - umidade volumétrica residual do solo, em $m^3 m^{-3}$; θ_s - umidade volumétrica do solo saturado, em $m^3 m^{-3}$; m e n - parâmetros de regressão da equação, adimensionais; α - parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, em kPa^{-1} ; e Ψ_m - potencial mátrico, em kPa.

Mensurações nas plantas

As medidas do potencial de água na folha foram feitas com câmera de pressão tipo Scholander (Modelo 3005, Soil Moisture Equipment Corporation, Santa Bárbara, CA, EUA) (SCHOLANDER et al., 1964). Foram feitas três avaliações de potencial de água na folha durante a aplicação dos níveis de reposição de água no solo. As folhas adotadas de cada planta para as mensurações foram as folhas do 3º e/ou 4º par do terço superior ($n=4$) com 4 análises para cada período. As coletas foram feitas antes do amanhecer e as folhas escolhidas foram embrulhadas em folha de alumínio e armazenadas em local com temperatura controladas durante no máximo uma hora antes da amostragem.

Trocas gasosas

As trocas gasosas (H_2O e CO_2) ocorridas nas pelas plantas foram medidas com sistema de analisador de gases por infravermelho portátil (LI-6400XT, Li-cor, Lincoln, NE, USA). As medições das trocas gasosas foram realizadas entre os horários de 09:00 e 12:00 horas; a concentração de CO_2 no ar, durante as medições foram fixados em $400 \pm 5 \mu mol^{-1}$; a umidade relativa mantida no interior da câmera ficou entre 50 e 60%, temperatura adotada ambiente e para determinação da densidade do fluxo de fótons fotossinteticamente ativo - DFFFA no interior da câmera foi realizado uma análise prévia da curva de resposta fotossintética à luz entre 0 e $2500 \mu mol m^{-2} s^{-1}$, e o valor usado foi de $500 \mu mol m^{-2} s^{-1}$.

Temperatura do dossel das plantas

A temperatura da folha/dossel foi obtida por meio das imagens térmicas com câmera de infravermelho de marca Flir modelo T640 produzindo imagens térmicas com resolução de 640 x 480 pixels com uma precisão de $\pm 0,06^\circ\text{C}$ e sensibilidade termal de $0,035^\circ\text{C}$, e faixa de temperatura de trabalho entre -40°C a 2.000°C . As imagens térmicas foram tomadas em conjunto com as medidas das trocas gasosas nas folhas das plantas, a fim de observar as relações entre temperatura foliar e as trocas de gases com o ambiente em função dos respectivos manejos de irrigação adotados pela planta. O processamento e análise foram realizados por meio do software Flir Tools V. 5.2.15161. As imagens zenitais foram tiradas de aproximadamente 1,0 m de cada parcela experimental, no mesmo ângulo e posicionamento. No software foi selecionada a área da imagem de 100 x 100 pixels (aproximadamente 400 cm²) do terço superior da planta, considerada uma porção representativa do dossel.

Mensuração dos dados meteorológicos

O monitoramento da radiação solar global (Q_g) se deu por meio de piranômetro de fotodiodo de silício (LI200X - Campbell Sci.), temperatura do ar ($^\circ\text{C}$) e a umidade relativa (%) com sensor Vaissala (HMP45C - Campbell Sci.) instalados no interior da casa de vegetação com intervalo de coleta de 15 minutos (valores médios).

CWSI - Crop Water Stress Index

O Crop water stress index - CWSI é definido na (Equação 3) baseada na diferença entre a temperatura do dossel e a temperatura do ar ($T_c - T_a$) sendo determinado pela fórmula de Idso et al., (1981).

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LBI}}{(T_c - T_a)_{LBS} - (T_c - T_a)_{LBI}} \quad (3)$$

Em que: T_c é a temperatura do dossel; T_a é a temperatura média do ar; $(T_c - T_a)_{LBI}$ é a linha base de temperatura inferior, que corresponde à 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; $(T_c - T_a)_{LBS}$ é a linha base de temperatura superior, correspondente à diferença de temperatura do ar quando a resistência para a perda de água do dossel aumentar sem limites ou correspondente à temperatura da superfície seca.

O índice de estresse baseado em temperatura térmica foi calculado a partir de medições feitas uma vez ao dia ou durante um curto período de tempo, próximo ao meio-dia e em condições livres de nuvens. O CWSI tende para 0 após as irrigações e sobe progressivamente para 1 como a água do solo está esgotada (O'SHAUGHNESSY et al., 2012). Neste trabalho, optou-se pela perspectiva empírica seguindo a metodologia de Idso et al., (IDSO et al., 1981; RAMÍREZ et al., 2015).

3.3 Resultados e discussão

Na Figura 1 (a) é mostrada a variação temporal da temperatura do ar a cada 15 minutos, os círculos com bordas brancas representam a média de cada dia, no decorrer dos quatro períodos de estudo. A temperatura média de cada período foi: $27,17 \pm 5,70$; $22,52 \pm 5,40$; $20,44 \pm 6,04$ e $25,49 \pm 6,10$ °C para os períodos 1(verão/outono), 2 (outono), 3 (inverno) e 4 (primavera/verão) respectivamente. Os maiores valores de temperatura ocorreram nos períodos 1 e 4 com valores na ordem de 45°C; vale ressaltar que esse evento ocorreu em apenas dois dias. A menores temperatura registrada foi no período 3 o que corresponde a época do inverno e as menos temperaturas ficaram na ordem de 9 °C. Na Figura 1 (b) são observadas variação da distribuição dos dados de temperatura no mesmo período.

O café arábica apresenta seu melhor desenvolvimento entre temperaturas médias anuais de 18° a 22°C. Acima de 28°C verifica-se a diminuição da atividade fotossintética e com mais de 34°C de temperatura pode ocorrer o abortamento de flores (CASSIO FRANCO MOREIRA; ARTUR ORELLI PAIVA; CAIO VINÍCIUS CINTRA DINIZ, 2017).

Os maiores valores de temperatura foram acompanhados no primeiro e quarto período; nesses dois períodos a temperatura no ambiente ficou um pouco acima do considerado ótimo para cultura (BENTO; DE CAMARGO; CAMARGO, 2010).

Figura 1. Variação da temperatura do ar °C (a); variação da distribuição dos dados de temperatura no mesmo período (b); umidade relativa do ar % (c) e correlação entre temperatura do ar e umidade relativa do ar no interior da casa de vegetação no decorrer de cada período do ano (d); os círculos com bordas brancas representam a média de cada dia.

Na Figura 1 (c) são mostrados a umidade relativa do ar nos períodos 1, 2, 3 e 4; os valores médios para cada período foram: 76, 80, 76 e 76% concomitantemente. Vale salientar que as análises realizadas ocorreram entre às 09:00 e 14:00 horas; para esses horários as condições a umidade média nos períodos foram de 57, 60, 55 e 57%. Na Figura 1 (d) são apresentadas as correlações lineares negativas para a umidade relativa do ar (%) com a temperatura do ar (°C), em cada período de estudo, que apresentaram os coeficientes de correlação ($R^2=0.93$; 0.79 ; 0.83 e 0.72), para os períodos 1, 2, 3 e 4). A umidade relativa determina o gradiente de pressão de vapor entre a cavidade estomática foliar e a atmosférica; o delta de pressão de vapor apresenta-se como a força motora do processo de perda de água pelo processo de transpiração (TAIZ; ZEIGER, 2015). Neste estudo condições com umidade relativa muito baixa ocorram apenas uma vez, no mês de setembro com valores abaixo de 20%, ressaltando ainda mais que o estresse acometido pela planta foi decorrente do nível de reposição de água no solo.

Condições com umidade relativa muito baixa contribuem para um alto gradiente de pressão de vapor, que pode levar ao estresse hídrico mesmo quando o conteúdo de água está próximo da capacidade de campo (TAIZ; ZEIGER, 2015; CRAPARO et al., 2017a).

O estresse hídrico é um importante fator limitante para a produção de café, principalmente na região do Sudeste do Brasil. Este estudo revelou a presença de diferenças na suscetibilidade ao estresse hídrico entre em cada umas das épocas estudadas, bem como entre as variações nas reposições hídricas. Nosso estudo, mostrou que os níveis de reposições hídricas adotados no manejo da irrigação no cafeeiro tiveram impactos significativos de acordo com o teste de médias em 5% de probabilidade na assimilação de CO_2 , como podem ser observados na Figura 2 (a). Na Figura 2 (b) são apresentados o percentual do acumulado da assimilação de CO_2 dos níveis de reposição hídrica trabalhados em cada período.

Os valores observados para o nível de reposição hídrica de 100% θ_{cc} nos quatro períodos foram em média 6.89; 6.10; 2.70 e 5.23 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ respectivamente para os períodos 1, 2, 3 e 4; todos os tratamentos comparados com o nível de reposição de 100% θ_{cc} apresentaram reduções significativas na troca gasosa. Os valores de assimilação de CO_2 encontrados nesse trabalho corroboram com estudos realizados com a mesma variedade, no qual foram estudados as trocas de gás de copa inteira em *Coffea* sp. (MAUAD et al., 2017). No nível de 40% θ_{cc} a taxa de assimilação foi a menor que em todos os períodos estudados apresentado valores de 0.49; 4.25; 0.07 e 1.60 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ respectivamente no períodos 1, 2, 3 e 4. A redução percentual no nível de reposição de 100% comparado com 40% θ_{cc} foi de 92.79; 30.24; 97.35 e 69.25% para os períodos 1, 2, 3 e 4 respectivamente para taxa de assimilação de CO_2 .

Figura 2. Resposta da assimilação da assimilação de CO_2 A - $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para os níveis de reposição hídrica de 40, 70, 100 e 130 θ_{cc} , para cada período (a); percentuais de assimilação de cada nível de reposição em cada período (b), médias seguidas pela mesma letra não diferem em 5% probabilidade pelo teste de Tukey.

Na condutância estomática - g_s os maiores valores observados foram nos períodos 3 e 4 com 0.032 e 0.018 $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; assim como a taxa de assimilação de CO_2 as g_s também apresentaram impactos significativos de acordo com o teste de médias em 5% de

probabilidade tal como pode ser observado na Figura 3 (a). A Figura 3 (b) são apresentados o percentual do acumulado da g_s mmol H₂O m⁻² s⁻¹ dos níveis de reposição hídrica trabalhados em cada período.

Vale ressaltar que o estresse hídrico foi maior no período 2, que corresponde à fase de temperaturas mais frias do estudo, a redução percentual em o nível de reposição de 100% comparado com 40% θ_{cc} foi de 97.35% mostrando-se muito sensível a essas condições de estresse hídrico mais severos. O estresse hídrico por excesso causou reduções significativas em todos os períodos estudados; no entanto, o período 1 (versão/outono) apresentou a maior redução percentual da g_s . No nível de reposição de 100% comparado com o de 130% θ_{cc} a redução na g_s chegou a 41,18%. Na Figura 3 (b), a g_s acumulada nas quatro condições de reposição hídrica mostra que o período 1 destacou-se o manejo com 100% θ_{cc} correspondendo a 54% do total da somatória das g_s .

Este estudo mostrou que a reposição de água no solo ocasionou estresse hídrico, tanto pelo déficit quanto pelo excesso, como visto, a fotossíntese reduziu significativamente a taxa de assimilação líquida do café arábica, devido à diminuição da condutância estomática induzida pelo estresse hídrico, como pode ser observada na Figura (3) ou a obstrução do CO₂ nas folhas, ou o declínio da atividade fotossintética das células mesófilas (CHASTAIN et al., 2014). Esses resultados corroboram com o estudo realizados no sudoeste da China com impactos da irrigação regulada por déficit na produtividade em café arábica (LIU et al., 2018), que indicam que a condutância estomática é muito sensível ao estresse hídrico no cafeeiro; aquele foi realizado dentro da faixa de estresse hídrico observada neste estudo.

Figura 3. Resposta da condutância estomática g_s - mol H₂O m⁻² s⁻¹ para os níveis de reposição hídrica de 40, 70, 100 e 130 θ_{cc} , para cada período (a); percentuais de condutância estomática de cada nível de reposição em cada período (b); médias seguidas pela mesma letra não diferem em 5% probabilidade pelo teste de Tukey.

Na taxa de transpiração – E os resultados foram semelhantes aos observados na g_s com destaque para o nível de 100% cujas taxas de E foram 0.45; 0.39; 1.17 e 0.67 mmol H₂O m⁻² s⁻¹, para os períodos de 1, 2, 3 e 4. Eles mostram alterações significativas em 5% de probabilidade como podem ser observadas na Figura 4 (a). Na Figura 4 (b) são apresentados os percentuais do acumulado da E nos níveis de reposição hídrica trabalhados em cada período. Assim como na A e g_s a taxa transpiratória na cultura apresentou os menores valores na reposição hídrica de 40% θ_{cc} , 0,0224 e 0,0287 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ para os períodos 1 (verão/outono) e 3 (inverno).

No presente estudo, a cultivar de café Catuaí 144 apresentou grande decréscimo na A, g_s e na E, com esse decréscimo sugerindo uma forte sensibilidade dos estômatos do cafeeiro ao aumento do déficit hídrico. Como a fotossíntese e a transpiração são influenciadas pela condutância estomática, a ocorrência de baixos valores de g_s pode afetar o crescimento da cultura devido à baixa taxa de assimilação de CO₂ (WANG; GARTUNG, 2010; BEGUM et al., 2012; EGEA et al., 2017).

Sob adequado suprimento de água até a θ_{cc} , o café apresentou boas taxas de assimilação de CO₂, g_s e E como foram observados nas Figuras (2, 3 e 4). Em qualquer caso, sob fornecimento limitado de água, o cafeeiro apresentou diminuição da taxa transpiratória em todos os períodos estudados. Sob condições de seca, o ajuste osmótico ou o aumento da elasticidade da parede celular, ou ambos, podem melhorar a manutenção do turgor, permitindo que a atividade fisiológica seja mantida por longos períodos de seca (DIAS et al., 2007).

Além disso, à medida que a seca avança, o fechamento estomático frequentemente resulta em menor perda de água por carbono assimilado, melhorando, portanto, a eficiência do uso da água (WUE) (KRAMER et al., 1996). No entanto, traços que aumentam o WUE podem entrar em conflito com aqueles associados a alta produtividade (JONES, 2004), ou seja, o baixo nível de reposição hídrica na planta afeta diretamente a relação A/E. A planta torna-se, mais eficiente no uso da água em condições pontuais, mas a produtividade é comprometida devido à baixa assimilação de CO₂, que implica em baixo armazenamento de carboidratos pela planta (TAIZ; ZEIGER, 2015).

Já a eficiência intrínseca do uso da água – iWUE (trata-se da relação A/ g_s); para que ocorra um aumento na iWUE implica que as plantas estejam utilizando mais eficientemente a água quando a disponibilidade de umidade do solo foi reduzida. Assim, as plantas são capazes

de se adaptar bem ao estresse hídrico, ajustando iWUE, especialmente pelo controle de estômatos, que também afeta A e E, otimizando assim a fixação de carbono durante a seca (TOUNEKTI et al., 2018b).

Figura 4. Transpiração E - mmol H₂O m⁻² s⁻¹ para os níveis de reposição hídrica de 40, 70, 100 e 130% θ_{cc} , para cada período (a); percentuais de transpiração de cada nível de reposição em cada período (b); médias seguidas pela mesma letra não diferem em 5% probabilidade pelo teste de Tukey.

As correlações entre as medidas das trocas gasosas foliares da fotossíntese líquida (A); condutância estomática (g_s); transpiração (E); e os parâmetros do potencial de água na folha (Ψ_{leaf}); temperatura da folha - T_{leaf} (°C); *Crop Water Stress Index* (CWSI); variação da temperatura entre T_{leaf} e T_{air} e os níveis de reposição hídrica (WRL), nos quatro períodos de estudos, são mostradas na Figura (5).

As correlações produziram resultados consistentes e significativos na maioria das variáveis estudadas, dentre os períodos que apresentaram os maiores coeficiente de correlação média. O período 4, correspondente à época da primavera/verão, obteve o valor coeficiente de correlação de: ($R^2=0,80$); seguido do período 3, ($R^2=79,3$); período 2 ($R^2= 73,2$) e o período 1 com ($R^2=71,9$).

Com reduções e aumentos dos níveis de deposição hídrica no solo, as trocas gasosas: fotossintética líquida (A); (g_s) e (E) sofreram reduções significativas ($p<0,001$) nos quatro períodos de avaliação como foi visto (Figura 2, 3 e 4). O déficit hídrico no ambiente afeta o armazenamento, a translocação e o metabolismo dos carboidratos (TAIZ; ZEIGER, 2015); como produtos finais da fotossíntese, os carboidratos armazenados são geralmente usados como indicadores do potencial de crescimento das plantas. Nesse contexto, o conhecimento de indicadores de estresse nas plantas facilita a tomada de decisão no manejo da água a fim de reduzir os problemas decorrentes ao estresse hídrico (BISWAL et al., 2011; MATHUR;

AGRAWAL, 2014). As correlações aqui estudadas apresentam-se como indicativos das variáveis que podem ser adotadas como ferramenta na medição do nível de estresse que a planta está acometida (EKSTEEN; SINGELS; NGXALIWE, 2014; CASTRO-NAVA et al., 2016).

As taxas de assimilação de CO₂ como processo que indicam o potencial de crescimento e desenvolvimento das plantas, são governadas pelas condutâncias difusas que limitam a transferência de CO₂ da atmosfera para os locais de carboxilação (TOUNEKTI et al., 2018c). Tradicionalmente, os estômatos têm sido considerados como tendo o papel principal no controle desse processo (SILVA et al., 2014; TAIZ; ZEIGER, 2015; O TAVARES et al., 2017).

O cafeeiro submetido a condições de seca, como ocorre frequente nas regiões de produção do Brasil e do mundo, regula o seu estado hídrico por meio de diversas adaptações morfológicas, anatômicas e fisiológicas para controlar a perda de água e aumentar a absorção de água (MORGAN, 1984; DAMATTA et al., 2006b; CRAPARO et al., 2017b). Em condições de déficit hídrico, o ajuste osmótico ou o aumento da elasticidade da parede celular, ou ambos, podem melhorar a manutenção do turgor, permitindo que a atividade fisiológica seja mantida por longos períodos de seca (TAIZ; ZEIGER, 2015).

O CWSI correlacionado com as trocas gasosas (A, g_s e E) apresentou respostas significativas com coeficiente de correlação (R²=0,40; 0,54; 0,75 e 0,65 para A); (R²=0,55; 0,34; 0,70 e 0,71 para g_s) e (R²=0,79; 0,57; 0,74 e 0,89 para E), nos períodos 1, 2, 3 e 4 respectivamente. Essas variações dos coeficientes encontrados em cada período são explicadas pelas mudanças oriundas no interior da casa de vegetação em cada período, além do que a cultura do café, planta muito responsiva fisiologicamente, pode variar com ambiente e variáveis como a luz solar, pode melhorar ou agravar o problemas à respostas da cultura aos níveis de estresse utilizados em cada condição de manejo da cultura (Bertrand et al., 2016).

Figura 5. Correlações (coeficiente de correlação de Pearson) entre as medidas da fotossíntese líquida (A); condutância estomática (g_s); transpiração (E); potencial hídrico foliar (Ψ_{leaf}); temperatura do dossel (T_{leaf}); Índice de estresse hídrico de culturas (CWSI); temperatura do dossel - temperatura do ar (T_c-T_a); nível de reposição hídrica (WRL). Para cada um dos quatros períodos de avaliação.

Os resultados mostrados na Figura (6) evidenciaram a análise de redundância (RDA) entre as tocas gasosas (A, g_s, E) e as variáveis potencial de água na folha (Ψ_{leaf}); temperatura da copa/folha (T_{leaf}); índice de estresse hídrico da cultura (CWSI); temperatura da cultura – temperatura do ar (T_c-T_a); para os períodos 1, 2, 3, 4 e análise conjunto com todos os períodos. Uma Análise de Redundância Canônica (RDA) foi realizada para identificar variáveis ecofisiológicas e termais significativas. Na RDA, as tocas gasosas (A, g_s, E), o potencial de água na folha (Ψ_{leaf}) e o índice de estresse hídrico da cultura (CWSI), foram consideradas como variáveis de resposta; já a temperatura da copa/folha (T_{leaf}); temperatura da cultura – temperatura do ar (T_c-T_a) e temperatura do ar (T_{air}) como variáveis explicativas.

Foram realizados testes de Monte Carlo baseado em 499 permutações aleatórias para cada período, produzindo os valores dep e Wilk's lambda (%), estimando assim a significância de cada correlação (Baretta et al., 2008).

Quando se compara os níveis de reposição hídrica, encontra-se forte separação entre os grupos 100 θ_{cc} com os demais grupos 40, 70 e 130 θ_{cc} nos quatros períodos. As reposições de 70 e 130 θ_{cc} apresentaram um posicionamento intermediário, já no nível 40 θ_{cc} os agrupamentos mostram-se com maior amplitude e forte efeito na distribuição dos grupos. Cada eixo representou uma proporção da variação estudada e foi correlacionado em diferentes graus aos parâmetros medidos.

O eixo 1 representou a maior parte da variação dos parâmetros analisados e pode explicar 71% dessa variação no período 1, nos períodos 2, 3 e 4 os percentuais foram: 62,1; 83,5 e 93,3% respectivamente. Assim, a RDA dos parâmetros estudados permitiu identificar a diferenciação significativa entre os parâmetros analisados. Os resultados obtidos corroboram com as respostas obtidas nas correlações da Figura (6) evidenciando as respostas fisiológicas e térmicas das plantas submetidas às condições de manejo hídrico distintos. Os resultados das RDAs dos tratamentos de estresse hídrico (moderado e grave) estão em consonância com os critérios estabelecidos (SNEATH; SOKAL, 1973).

Os vetores de resposta na cor azul, em todos períodos apresentam alta correlação, como pode ser visto pela aproximação um do outro, as trocas gasosas (A , g_s , E), que são explicadas pelas relações de troca de energia da folha com o ambiente, no qual são influenciados pela umidade do solo como podem ser visto no decorrer do estudo. O Ψ_{leaf} apresentou correlação positiva, no entanto, o período 1 e 2 os valores de correlação de Pearson foram ($R^2=0.24$ e 0.64). Sob condições de déficit hídrico, o ajuste osmótico ou o aumento da elasticidade da parede celular, ou ambos, podem melhorar a manutenção do turgor, permitindo que a atividade fisiológica seja mantida por períodos mais longos de seca o que provavelmente explica esses baixos valores; esse comportamento corrobora com estudos realizados (KRAMER et al., 1996; DIAS et al., 2007; TOUNEKTİ et al., 2018d). Além disso, à medida que a seca avança, o fechamento estomático frequentemente resulta em menor perda de água por carbono assimilado.

Figura 6. Análise de redundância (RDA) entre medidas de fotossíntese líquida (A); condutância estomática (g_s); transpiração (E); potencial hídrico foliar (Ψ_{leaf}); temperatura do dossel (T_{leaf}); Índice de estresse hídrico de culturas ($CWSI$); temperatura do dossel - temperatura do ar ($T_c - T_a$); nível de reposição hídrica (WRL). Para cada período de avaliação.

3.4 Conclusões

Considerando essas tendências, a capacidade de obter informações rápidas sobre o funcionamento ou a adequação do cafeeiro em determinado ambiente (com ou sem estresse hídrico) seria benéfica, especialmente considerando os sistemas heterogêneos de plantio e manejo da água na cultura. Esses dados fornecem novas bases primárias para alcançar esses objetivos.

Agradecimentos

Este trabalho recebeu apoio do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processes nº 2012/50083-7 and USP - ETH-FAPESP:30761).

COSTA, Jéfferson de Oliveira. Padrões de resposta termal ao déficit hídrico na cultura do café irrigado por gotejamento. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016. doi:10.11606/D.11.2016.tde-15082016-110428. Acesso em: 2018-11-20. o em: 16 ago. 2018.

Referências

- AL-ABDULKADER, A. M.; AL-NAMAZI, A. A.; ALTURKI, T. A.; AL-KHURAISH, M. M.; AL-DAKHIL, A. I. Optimizing coffee cultivation and its impact on economic growth and export earnings of the producing countries: The case of Saudi Arabia. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 25, n. 4, p. 776–782, 1 maio 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X17302206>>. Acesso em: 4 dez. 2018.
- BEGUM, M. K.; ALAM, M. R.; ISLAM, M. S.; AREFIN, M. S. Effect of Water Stress on Physiological Characters and Juice Quality of Sugarcane. **Sugar Tech**, v. 14, n. 2, p. 161–167, 2012.
- BENTO, M.; DE CAMARGO, P.; CAMARGO, M. B. P. **The impact of climatic variability and climate AGROMETEOROLOGIA THE IMPACT OF CLIMATIC VARIABILITY AND CLIMATE CHANGE ON ARABIC COFFEE CROP IN BRAZIL (1) RESUMO IMPACTO DA VARIABILIDADE E DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA PRODUÇÃO DE CAFÉ ARÁBICA NO BRASIL**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/brag/v69n1/30.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

BISWAL, B.; JOSHI, P. N.; RAVAL, M. K.; BISWAL, U. C. **Photosynthesis, a global sensor of environmental stress in green plants: Stress signalling and adaptation** Current Science Current Science Association, , 2011. .

CASSIO FRANCO MOREIRA; ARTUR ORELLI PAIVA; CAIO VINÍCIUS CINTRA DINIZ. **Clima e água para uma cafeicultura sustentável**. [s.l: s.n.]

CASTRO-NAVA, S.; HUERTA, A. J.; PLÁCIDO-DE LA CRUZ, J. M.; MIRELES-RODRÍGUEZ, E. Leaf Growth and Canopy Development of Three Sugarcane Genotypes under High Temperature Rainfed Conditions in Northeastern Mexico. **International Journal of Agronomy**, v. 2016, p. 1–7, 23 ago. 2016. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/ija/2016/2561026/>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

CHASTAIN, D. R.; SNIDER, J. L.; COLLINS, G. D.; PERRY, C. D.; WHITAKER, J.; BYRD, S. A. Water deficit in field-grown *Gossypium hirsutum* primarily limits net photosynthesis by decreasing stomatal conductance, increasing photorespiration, and increasing the ratio of dark respiration to gross photosynthesis. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, n. 17, p. 1576–1585, 1 nov. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161714001977>>. Acesso em: 29 nov. 2018.

ÇOLAK, Y. B.; YAZAR, A.; ÇOLAK, İ.; AKÇA, H.; DURAKTEKIN, G. Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for Eggplant under Varying Irrigation Regimes Using Surface and Subsurface Drip Systems. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 4, p. 372–382, 2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210784315001059>>.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. 2017. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_01_17_14_51_54_boletim_cafe_-_janeiro_de_2017.pdf>. Acesso em: 20 set. 2017.

COSTA, J. D. O.; COELHO, R. D.; DA, T. H.; BARROS, S.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; FERNANDES, A. L. T. Engenharia Agrícola PHYSIOLOGICAL RESPONSES OF COFFEE TREE UNDER DIFFERENT IRRIGATION LEVELS. **Engenharia Agrícola**, n. 5, p. 648–656, 2019. Disponível em: <www.engenhariaagricola.org.br>. Acesso em: 23 fev. 2019.

CRAPARO, A. C. W.; STEPPE, K.; VAN ASTEN, P. J. A.; LÄDERACH, P.; JASSOGNE, L. T. P.; GRAB, S. W. Application of thermography for monitoring stomatal conductance of *Coffea arabica* under different shading systems. **Science of the Total Environment**, v. 609, p. 755–763, 2017a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.158>>.

CRAPARO, A. C. W.; STEPPE, K.; VAN ASTEN, P. J. A.; LÄDERACH, P.; JASSOGNE, L. T. P.; GRAB, S. W. Application of thermography for monitoring stomatal conductance of *Coffea arabica* under different shading systems. **Science of The Total Environment**, v. 609, p. 755–763, 31 dez. 2017b. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717318612>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

DA SILVA BARROS, T. H.; DE ARAUJO PEREIRA, A. P.; DE SOUZA, A. J.; RIBEIRO, N. L.; CARDOSO, E. J. B. N.; COELHO, R. D. Influence of Sugarcane Genotype and Soil Moisture Level on the Arbuscular Mycorrhizal Fungi Community. **Sugar Tech**, p. 1–9, 16 jul. 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12355-018-0640-0>>. Acesso em: 28 ago. 2018.

DAMATTA, F. M.; COCHICHO RAMALHO, J. D.; DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. **Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review** *Braz. J. Plant Physiol.* [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/bjpp/v18n1/a06v18n1.pdf>>. Acesso em: 4 dez. 2018a.

DAMATTA, F. M.; COCHICHO RAMALHO, J. D.; DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. **Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review** *Braz. J. Plant Physiol.* [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/bjpp/v18n1/a06v18n1.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2018b.

DIAS, P. C.; ARAUJO, W. L.; MORAES, G. A. B. K.; BARROS, R. S.; DAMATTA, F. M. Morphological and physiological responses of two coffee progenies to soil water availability. **Journal of Plant Physiology**, v. 164, n. 12, p. 1639–1647, 3 dez. 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161706003324>>. Acesso em: 29 nov. 2018.

EGEA, G.; PADILLA-DÍAZ, C. M.; MARTINEZ-GUANTER, J.; FERNÁNDEZ, J. E.; PÉREZ-RUIZ, M. Assessing a crop water stress index derived from aerial thermal imaging and infrared thermometry in super-high density olive orchards. **Agricultural Water Management**, v. 187, p. 210–221, 2017.

EKSTEEN, A.; SINGELS, A.; NGXALIWE, S. Water relations of two contrasting sugarcane genotypes. **Field Crops Research**, v. 168, p. 86–100, 2014.

FERREIRA, B.; CAVALCANTI, P.; ALVES, D.; MAINTAINER, N.; FERREIRA, E. B. Title Pacote Experimental Designs (Portuguese). 2018. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/ExpDes.pt/ExpDes.pt.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2018.

FISCHER, H. W.; REDDY, N. L. N.; RAO, M. L. S. Can more drought resistant crops promote more climate secure agriculture? Prospects and challenges of millet cultivation in Ananthapur, Andhra Pradesh. **World Development Perspectives**, v. 2, p. 5–10, 1 jun. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S245229291630090X>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

FITA, A.; RODRÍGUEZ-BURRUEZO, A.; BOSCAIU, M.; PROHENS, J.; VICENTE, O. Breeding and Domesticating Crops Adapted to Drought and Salinity: A New Paradigm for Increasing Food Production. **Frontiers in plant science**, v. 6, p. 978, 2015. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26617620>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

GARCIA-TEJERO, I. F.; HERNÁNDEZ, A.; PADILLA-DÍAZ, C. M.; DIAZ-ESPEJO, A.; FERNÁNDEZ, J. E. Assessing plant water status in a hedgerow olive orchard from thermography at plant level. **Agricultural Water Management**, v. 188, p. 50–60, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.004>>.

GONZALEZ-DUGO, V.; ZARCO-TEJADA, P. J.; FERERES, E. Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 198–199, p. 94–104, 1 nov. 2014a. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192314001841#bib0125>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

GONZALEZ-DUGO, V.; ZARCO-TEJADA, P. J.; FERERES, E. Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 198–199, p. 94–104, 1 nov. 2014b. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192314001841>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

GUEDES, F. A. de F.; NOBRES, P.; RODRIGUES FERREIRA, D. C.; MENEZES-SILVA, P. E.; RIBEIRO-ALVES, M.; CORREA, R. L.; DAMATTA, F. M.; ALVES-FERREIRA, M. Transcriptional memory contributes to drought tolerance in coffee (*Coffea canephora*) plants. **Environmental and Experimental Botany**, v. 147, p. 220–233, 1 mar. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847217303106#fig0030>>. Acesso em: 4 dez. 2018.

IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J. J.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L. Normalizing the stress-degree-day parameter from environmental variability. **Agricultural Meteorology**, v. 24, p. 45–55, 1981.

IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L.; WALKER, G. K.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J. A generalization of the stress-degree-day concept of yield prediction to accommodate a diversity of crops. **Agricultural Meteorology**, v. 21, n. 3, p. 205–211, 1980.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. **Global coffee production by all exporting countries.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.ico.org/prices/po-production.pdf>>. Acesso em: 4 dez. 2018.

JACKSON, R. D.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; PINTER, P. J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water Resources Research**, v. 17, n. 4, p. 1133–1138, 1981.

JACKSON, R. D.; KUSTAS, W. P.; CHOUDHURY, B. J. A reexamination of the crop water stress index. **Irrigation Science**, v. 9, n. 4, p. 309–317, 1988.

JONES, H. G. Application of Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Physiology and Ecophysiology. In: [s.l.: s.n.]p. 107–163.

KHOLOVÁ, J.; HASH, C. T.; KAKKERA, A.; KOČOVÁ, M.; VADEZ, V. Constitutive water-conserving mechanisms are correlated with the terminal drought tolerance of pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.]. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 2, p. 369–377, 1 jan. 2010. Disponível em: <<https://academic.oup.com/jxb/article-lookup/doi/10.1093/jxb/erp314>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

KRAMER, P. J. (Paul J.); BOYER, J. S. (John S.); KRAMER, P. J. (Paul J.); BOYER, J. S. (John S. **Water relations of plants and soils.** [s.l.] Academic Press, 1996. v. 161

KRASENSKY, J.; JONAK, C. **Drought, salt, and temperature stress-induced metabolic rearrangements and regulatory networks** *Journal of Experimental Botany*, 2012. . Disponível em: <<https://academic.oup.com/jxb/article-abstract/63/4/1593/448768>>. Acesso em: 4 dez. 2018.

KUSAKA, M.; LALUSIN, A. G.; FUJIMURA, T. The maintenance of growth and turgor in pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] Leeke) cultivars with different root structures and osmoregulation under drought stress. **Plant Science**, v. 168, n. 1, p. 1–14, 1 jan. 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168945204002808>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

LIMA, R. S. N.; GARCÍA-TEJERO, I.; LOPES, T. S.; COSTA, J. M.; VAZ, M.; DURÁN-ZUAZO, V. H.; CHAVES, M.; GLENN, D. M.; CAMPOSTRINI, E. Linking thermal imaging to physiological indicators in *Carica papaya* L. under different watering regimes. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 148–157, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.017>>.

LIU, X.; QI, Y.; LI, F.; YANG, Q.; YU, L. Impacts of regulated deficit irrigation on yield, quality and water use efficiency of Arabica coffee under different shading levels in dry and hot regions of southwest China. **Agricultural Water Management**, v. 204, p. 292–300, 31 maio 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377418304165>>. Acesso em: 29 nov. 2018.

MATHUR, S.; AGRAWAL, D. Photosynthesis: Response to high temperature stress. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 137, p. 116–126, ago. 2014.

MAUAD, F. F.; DA, L.; FERREIRA, C.; COSTA, T.; TRINDADE, G.; CARLOS, S. **Energia Renovável no Brasil Análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras**.

MORGAN, J. M. Osmoregulation and Water Stress in Higher Plants. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 35, n. 1, p. 299–319, 28 jun. 1984. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.pp.35.060184.001503>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

NELSON, W. C. D.; HOFFMANN, M. P.; VADEZ, V.; ROETTER, R. P.; WHITBREAD, A. M. Testing pearl millet and cowpea intercropping systems under high temperatures. **Field Crops Research**, v. 217, p. 150–166, 2018.

O'SHAUGHNESSY, S. A.; EVETT, S. R.; COLAIZZI, P. D.; HOWELL, T. A. A crop water stress index and time threshold for automatic irrigation scheduling of grain sorghum. **Agricultural Water Management**, v. 107, p. 122–132, maio 2012.

O TAVARES, T. DE; DAMASCENO, A. F.; VOLTARELLI, M. A.; DA SILVA, R. P.; A FURLANI, C. E. EFFECTIVE POWER AND HOURLY FUEL CONSUMPTION DEMANDED BY SET TRACTOR-COFFEE HARVESTER IN FUNCTION OF ADEQUACY TRACTOR BALLASTING. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering Agríc. Jaboticabal**, v. 37, n. 4, 2017. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v37n4/1809-4430-eagri-37-04-0699.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2017.

PADAKANDLA, S. R. Climate sensitivity of crop yields in the former state of Andhra Pradesh, India. **Ecological Indicators**, v. 70, p. 431–438, 1 nov. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X16303077>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

RAMÍREZ, A. J. F.; COELHO, R. D.; PIZANI, M. A. M.; SILVA, C. J. da. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTRESSE HÍDRICO EM TOMATEIROS CEREJA (*Lycopersicum Solanum* var. cerasiforme.) COM CÂMARA INFRAVERMELHA. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 9, n. 4, p. 218–224, 2015. Disponível em: <http://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/356/pdf_224>.

RAY D. JACKSON. Canopy Temperature and Crop Water Stress. **Advances in Irrigation**, v. 1, p. 43–85, 1 jan. 1982. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780120243013500095>>. Acesso em: 21 set. 2017.

SAKAI, E.; BARBOSA, E. A. A.; SILVEIRA, J. M. de C.; PIRES, R. C. de M. Coffee productivity and root systems in cultivation schemes with different population arrangements and with and without drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 148, p. 16–23, 31 jan. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377414002595>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H. T.; HEMMINGSEN, E. A.; BRADSTREET, E. D. HYDROSTATIC PRESSURE AND OSMOTIC POTENTIAL IN LEAVES OF MANGROVES AND SOME OTHER PLANTS. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 52, n. 1, p. 119–25, jul. 1964. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16591185>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

SILVA, B. M.; DA SILVA, E. A.; DE OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, M. M.; SERAFIM, M. E. Plant-Available Soil Water Capacity: Estimation Methods and Implications. **Revista Brasileira De Ciencia Do Solo**, v. 38, n. 2, p. 464–475, 2014.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, É. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; MELO, L. B. B.; NORTON, L. D.; CURTI, N. Soil moisture associated with least limiting water range, leaf water potential, initial growth and yield of coffee as affected by soil management system. **Soil and Tillage Research**, v. 189, p. 36–43, 1 jun. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016719871830463X>>. Acesso em: 23 fev. 2019.

SNEATH, P. H. A.; SOKAL, R. R. Numerical taxonomy. The principles and practice of numerical classification. **Numerical taxonomy. The principles and practice of numerical classification.**, 1973. Disponível em: <<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19730310919>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

SOUZA, R. P.; MACHADO, E. C.; SILVA, J. A. B.; LAGÔA, A. M. M. A.; SILVEIRA, J. A. G. Photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and some associated metabolic changes in cowpea (*Vigna unguiculata*) during water stress and recovery. **Environmental and Experimental Botany**, v. 51, n. 1, p. 45–56, 1 fev. 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847203000595#FIG3>>. Acesso em: 17 ago. 2018.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology (sixth edition)**. Universitat Jaume I, 2015.

TOUNEKTI, T.; MAHDHI, M.; AL-TURKI, T. A.; KHEMIRA, H. Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia. **South African Journal of Botany**, v. 117, p. 17–25, 1 jul. 2018a. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254629918300255>>. Acesso em: 4 dez. 2018.

TOUNEKTI, T.; MAHDHI, M.; AL-TURKI, T. A.; KHEMIRA, H. Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia. **South African Journal of Botany**, v. 117, p. 17–25, 1 jul. 2018b. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254629918300255>>. Acesso em: 1 mar. 2019.

TOUNEKTI, T.; MAHDHI, M.; AL-TURKI, T. A.; KHEMIRA, H. Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia. **South African Journal of Botany**, v. 117, p. 17–25, 1 jul. 2018c. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254629918300255>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

TOUNEKTI, T.; MAHDHI, M.; AL-TURKI, T. A.; KHEMIRA, H. Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia. **South African Journal of Botany**, v. 117, p. 17–25, 1 jul. 2018d. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254629918300255>>. Acesso em: 29 nov. 2018.

VADEZ, V.; KHOLOVÁ, J.; YADAV, R. S.; HASH, C. T. Small temporal differences in water uptake among varieties of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) are critical for grain yield under terminal drought. **Plant and Soil**, v. 371, n. 1–2, p. 447–462, 10 out. 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11104-013-1706-0.pdf>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

VAN GENUCHTEN, M. T. **A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils**. *Soil Science Society of America Journal*, 1980. . Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/44/5/SS0440050892>>.

WANG, D.; GARTUNG, J. Infrared canopy temperature of early-ripening peach trees under postharvest deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 11, p. 1787–1794, 2010.

WICKHAM, H. Introduction. In: **ggplot2**. New York, NY: Springer New York, 2009. p. 1–7.

WINKEL, T.; RENNO, J.-F.; PAYNE, W. A. Effect of the timing of water deficit on growth, phenology and yield of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) grown in Sahelian conditions. **Journal of Experimental Botany**, v. 48, n. 5, p. 1001–1009, 1 maio 1997. Disponível em: <<https://academic.oup.com/jxb/article-lookup/doi/10.1093/jxb/48.5.1001>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

4 IMAGENS TÉRMICAS APLICADA AO AMENDOIM IRRIGADO (*Arachis hypogaea* L.) PARA O DIAGNÓSTICO DO ESTRESSE HÍDRICO

Resumo

O amendoim é a segunda leguminosa mais importante do mundo, e os produtos à base de amendoim têm um grande potencial no Brasil e em outros países tropicais em desenvolvimento. O presente trabalho visa aprimorar a detecção remota das características de rendimento das plantas de amendoim com base no uso da termografia por infravermelho termal para mensuração da temperatura da folha, a qual apresenta correlação elevada com parâmetros fisiológicos e de produtividade das plantas, no que diz respeito à detecção do nível de estresse hídrico que as mesmas estão sujeitas no campo. O experimento foi realizado em casa de vegetação na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. Os tratamentos consistiram de 4 níveis de reposição hídrica com base na umidade do solo mantida na capacidade de campo (θ_{cc}) denominado de nível 100%; assim, os níveis foram estabelecidos em 50, 75, 100 e 125% θ_{cc} . As trocas gasosas (H_2O e CO_2) realizadas pelas plantas foram medidas com sistema de analisador de gases por infravermelho; o potencial de água na folha foi coletado com câmera de pressão tipo Scholander; já a temperatura foliar e o índice CWSI foi calculado com base em imagens térmicas de câmera infravermelha. A termografia por infravermelha apresenta-se como uma ferramenta alternativa, não invasiva na agricultura moderna, abordando a melhoria na gestão dos recursos hídricos, por facilitar a programação da irrigação e o monitoramento da água nas plantas de amendoim. As correlações entre as trocas gasosas e as respostas térmicas da cultura submetida a níveis de reposição hídrica apresentaram bons resultados, tendo a variação temperatura foliar e do ar (Tleaf-ar) como a base para entendimento do comportamento fisiológico da planta. As melhores condições de manejo hídrico para a fim de mitigar os efeitos negativos do estresse sobre o desempenho agrônômico do amendoim foi o nível de reposição de 100% θ_{cc} .

Palavras-chave: amendoim, estresse hídrico, eficiência do uso da água, indicadores de produtividade.

Abstract

Peanuts are the second most important legume in the world, presenting great potential in Brazil and other countries due to its food-industry application in several products. The present work aims to improve the remote sensing of peanut yield characteristics based on thermal infrared thermography for leaf temperature measurement, which has a high correlation with physiological and plant productivity parameters and to detect the level of water stress that they are subjected in the field. The experiment was carried out in a greenhouse at the “Luiz de Queiroz” College of Agriculture, University of São Paulo, São Paulo, Brazil. The treatments consisted of 4 levels of water replenishment based on soil moisture maintained at field capacity (θ_{cc}) denominated at 100% level, thus, the levels were established at 50, 75, 100 and 125% θ_{cc} . The gas exchanges (H_2O and CO_2) carried out by the plants were measured with an infrared gas analyzer system; the water potential in the leaf was collected with a Scholander pressure camera, already the leaf temperature and the CWSI index was calculated based on thermal images of infrared camera. Infrared thermography presents itself as an

alternative, non-invasive tool in modern agriculture, addressing the improvement in water resources management, which facilitates irrigation scheduling and water monitoring in peanut plants. The correlations between the gas exchange and the thermal responses of the crop submitted to water replenishment levels presented good results, with foliar temperature and Tleaf-air variation as the basis for understanding the physiological behavior of the plant. The best conditions of water management in order to mitigate the negative effects of stress on the agronomic performance of the peanut was the replacement irrigation level of 100% θ_{cc} .

Keywords: peanut, water stress, water use efficiency, productivity indicators.

4.1 Introdução

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.) é uma leguminosa nativa da América do Sul, sendo que estudos arqueológicos em macrofósseis e grãos de amido evidenciam que o amendoim entrou no vale do Zaña, na região norte do Peru, há aproximadamente 8500 anos, presumivelmente pelo lado leste da Cordilheira dos Andes, embora as cascas encontradas não apresentassem características semelhantes aos amendoins utilizados nos plantios comerciais atuais, (HAMMONS; HERMAN, 2016).

O amendoim é a segunda leguminosa economicamente mais importante do mundo ao lado da soja e a quarta mais importante cultura de sementes oleaginosas, contribuindo com cerca de 6% do óleo vegetal processado do mundo (SILVEIRA JUNIOR et al., 2016b), já a soja representa 41,8% do total mundial, o algodão 14,1% e a colza 13,1% (FAO, 2014). O amendoim apresenta alto potencial de produção, sendo uma fonte valiosa de óleo de alta qualidade (45% do peso seco), apresentando valor de proteína variando de 25-30% (LAUNIO; LUIS; ANGELES, 2018).

Os principais produtores mundiais de amendoim são a China, a Índia e os Estados Unidos com 43,9%, 22,9% e 5,3% da produção mundial respectivamente (FLETCHER; SHI, 2016; HAMMONS; HERMAN, 2016). Os principais importadores são o Japão, a Indonésia e os países Europeus que comercializam anualmente cerca de um milhão de toneladas de grãos para confeitaria; os Estados Unidos e China consomem cerca de três milhões de toneladas da oleaginosa (O TAVARES et al., 2017).

No Brasil, o estado de São Paulo é atualmente o maior produtor de amendoim em território nacional, responsável por 95,43% de todo amendoim produzido pelo país safra 2018/19. O setor vem apresentado bons sinais de recuperação desde as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12 que apresentaram as menores produções da última década (CONAB,

2017). O estado produz basicamente o amendoim do tipo Runner, considerado resistente a pragas e produtivo, chegando à produtividade de 4,5 Mg ha⁻¹; em torno de 80% desse amendoim é destinado aos mercados europeus como Holanda, Reino Unido e Rússia, e Argélia na África (MARTINS et al., 2017)

A irrigação é essencial para ampliar a produtividade agrícola e a renda no campo; o uso da água para a agricultura até 2010 teve um aumento de 75% em relação a 1960 e 400% comparado com 1900, cerca de 2% da superfície terrestre total (BRASILEIRA et al., 2012; PADHI; MISRA; PAYERO, 2012; ERCIN; HOEKSTRA, 2014; ZHANG et al., 2016). Atualmente, cerca de 44% da produção agrícola mundial é proveniente de áreas irrigadas. Já a área cultivada para produzir esse montante é de apenas 18%, demonstrando assim o potencial da irrigação na produção de alimento (SILVA et al., 2014; VIANA et al., 2015; FAOSTAT, 2018). Diante disso, o uso eficiente da água na agricultura é um dos desafios agrícolas mais importantes no setor e torna o uso da irrigação de precisão cada vez mais comum e necessário (GONZALEZ-DUGO; ZARCO-TEJADA; FERERES, 2014c; SILVEIRA JUNIOR et al., 2016a).

A importância econômica da indústria do amendoim justifica a observação mais detalhada do status socioeconômico e tecnológico do setor agrícola de amendoim, e a determinação de fatores que podem aumentar a adoção de tecnologias de aumento de produtividade e redução de custos para uma cultura agrícola com tal potencial no setor (GAJIĆ et al., 2018).

O presente trabalho visa aprimorar a detecção remota das características de rendimento das plantas de amendoim com base no uso da termografia por infravermelho termal para mensuração da temperatura da folha, a qual apresenta correlação elevada com parâmetros fisiológicos e de produtividade das plantas, no que diz respeito à detecção do nível de estresse hídrico que as mesmas estão sujeitas no campo (DEERY et al., 2016; GARCIA-TEJERO et al., 2017; GARCÍA-TEJERO et al., 2017b; KHORSANDI et al., 2018a), para assim identificar a variabilidade das plantas no campo, em escalas temporais e espaciais adequadas, antes que danos econômicos sejam claramente visíveis (NELSON et al., 2018).

Os fatores que interferem na alta produtividade das plantas de amendoim, estão associados com a fertilidade química, física e biológica do solo, às características tecnológicas de manejo do cultivo, às condições climatológicas durante o período de crescimento das plantas, à adoção de material genético mais adaptados ao local, ao uso de

sistemas de irrigação, fertilizantes, e outros insumos. Já os de origem fisiológica e bioquímicas como a interceptação de luz pela cobertura vegetal, eficiência metabólica das plantas, eficiência de translocação de fotoassimilados das folhas para as vagens são fundamentais para garantir alta produtividade; no entanto, a quantidade de água adequada durante todos os estágios de desenvolvimento de sua maturidade fisiológica apresenta-se como o fator fundamental no incremento da produtividade (REDDY; REDDY, 1993). Vale ressaltar a existência de alguns pontos críticos em seus estágios de crescimento como floração e enchimento de vagens que são muito sensíveis à disponibilidade de água do solo em comparação com maturação e a fase vegetativa (REDDY; REDDY; ANBUMOZHI, 2003). A falta de água durante estes pontos críticos reduz substancialmente o rendimento do grão e assim não maximiza o uso da água (LIPAN et al., 2019a; ZHANG et al., 2019).

As plantas de amendoim apresentam-se relativamente tolerante à seca, devido ao seu sistema radicular profundo, o qual permite explorar volume de solo das camadas mais profundas as quais possuem maior disponibilidade de água. As necessidades hídricas da cultura variam de 450 a 700 mm durante o ciclo. A máxima exigência hídrica ocorre durante o florescimento e frutificação. A falta de água no início do desenvolvimento faz com que ocorram problemas como atraso e irregularidades na germinação (CASTRO; KLUGE; PERES, 2005).

O estresse hídrico nas culturas induz o fechamento dos estômatos, que limita a transpiração e reduz o arrefecimento por evaporação, resultando em temperatura elevada nas folhas ou na copa das plantas (JONES et al., 2009). A temperatura das folhas podem, fornecer informações para estimar a condutância estomática ou vapor de água nas folhas (JONES, 2004). As relações entre a temperatura foliar e os parâmetros fisiológicos das folhas nem sempre são claras, nomeadamente sob condições favoráveis de temperatura do ar, quantidade/ângulo de irradiação incidente, velocidade do vento e déficit de pressão de vapor do ar (BEGUM et al., 2012; MAHDAVI et al., 2017).

A temperatura das plantas pode aumentar por meio do aquecimento convectivo e radiativo (GARCÍA-TEJERO et al., 2018a). O aquecimento por convecção ocorre quando a temperatura do ar excede a temperatura da planta e o calor é transferido para os tecidos da planta (JONES et al., 2009). Este processo convectivo também pode esfriar as plantas se a temperatura do ar estiver abaixo da temperatura da planta. Por sua vez, o aquecimento por

radiação ocorre quando a energia solar térmica é interceptada e absorvida pelas folhas (COSTA et al., 2019).

Na agricultura os métodos de determinação de estresse hídrico nas culturas são diversificados, como, por exemplo, aqueles baseados no uso de dendrômetros, fluxo de seiva, e ainda, sondas de pressão de turgor foliares (GONZALEZ-DUGO; ZARCO-TEJADA; FERERES, 2014a). Vale ressaltar que são técnicas trabalhosas, que podem dificultar a operacionalidade da atividade em áreas comerciais, estando restritas portanto suas aplicações em áreas de experimentação agrícola.

Uma vez que são necessárias ferramentas para a identificação da variabilidade espacial do estresse hídrico no campo, vários índices foram propostos para se quantificar de forma numérica o quanto o estresse hídrico pode estar afetando a produtividade das culturas no campo, com base em diversos trabalhos apresentados na literatura nas últimas quatro décadas (IDSO et al., 1980, 1981; JONES, 2004; GONZALEZ-DUGO; ZARCO-TEJADA; FERERES, 2014d).

No entanto, as culturas comerciais apresentam diversas características que impedem que os índices criados para essa finalidade sejam usados de forma dinâmica pelos produtores, devido a especificidades de cada método. Como exemplo, pode-se citar o *Índice de Estresse Hídrico da Cultura*, do inglês *Crop Water Stress Index* (CWSI), desenvolvido por Ray D. Jackson (1982) que é um método teórico baseado na relação entre a evapotranspiração real e a potencial, e na água disponível no solo. Nesse caso, são valores estimados para culturas generalizadas, nos quais o coeficiente de cultura K_c não é empregado.

Como a temperatura da folha é influenciada por condições ambientais, o CWSI relaciona a temperatura observada com as temperaturas mínima (não estressada) e a temperatura máxima (não transpirante) de uma cultura de referência sob condições ambientais similares (IDSO et al., 1980; JACKSON et al., 1981; JACKSON; KUSTAS; CHOUDHURY, 1988; GONZALEZ-DUGO; ZARCO-TEJADA; FERERES, 2014c). Assim, quando as plantas estão sob estresse hídrico, há um aumento da resistência estomática, que por sua vez restringe a perda do calor latente de vaporização, acarretando em aumento da temperatura foliar em relação ao ambiente (Çolak et al., 2015; Garcia-Tejero et al., 2017; Jackson, 1982).

O uso de imagens termais pode ser considerado como um substituto para a medição direta da perda de água pelas folhas, com base no princípio de que a redução da temperatura

é proporcional à taxa de perda de água devido ao processo de arrefecimento evaporativo (BROWN; ESCOMBE, 1905; LAPIDOT et al., 2019). O interesse no uso de imagens térmicas para avaliar o status da água da planta vem aumentando à medida que o preço diminui e a qualidade das câmeras térmicas estão sendo aprimoradas rapidamente (PETRIE et al., 2019). Isso inclui o uso de sistemas baseados em terra e veículos aéreos não tripulados (drones) para avaliar o status da água das culturas agrícolas que, sendo que dessa forma abre-se a possibilidade de automatizar esse processo (EGEA et al., 2017; KHANAL; FULTON; SHEARER, 2017; KLEM et al., 2018; COSTA et al., 2019; PETRIE et al., 2019).

Os objetivos deste trabalho foram: i) investigar o impacto do déficit hídrico nas relações hídricas na cultura amendoim; (ii) averiguar as correlações entre as trocas gasosas e as respostas termais do dossel da cultura submetida a diferentes níveis de reposição hídrica; e (iii) estabelecer melhores condições de manejo hídrico, com o intuito de mitigar os efeitos negativos do estresse hídrico sobre a produtividade de grãos e de óleo do amendoim.

4.2 Material e metodos

Área Experimental

O experimento foi realizado na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil (22°42'45" S; 47°37'54" W, 543 m de altitude). As plantas de amendoim foram cultivadas em casa de vegetação com área total de 160 m², em 56 vasos (com capacidade de 0,50 m³) de concreto com dimensões de 0,92 x 1,08 x 0,65 m, de comprimento, largura e profundidade, respectivamente. Os vasos foram distribuídos equidistantes com 0,5 m entre vasos e 1,0 m entre linhas. O cultivo foi realizado em um Latossolo Vermelho Amarelo.

Plantio e manejo da cultura

Para o presente trabalho foram utilizadas sementes de amendoim cultivar Runner IAC 886 foram tratadas com fungicida/inseticida Standak® Top (250 g L⁻¹ de fipronil + 25 g L⁻¹ de piraclostrobina + 225 g L⁻¹ de tiofanato metílico) na dose de 3 mL kg⁻¹. O amndoiim foi semeado em bandejas de polipropileno de 32 células, preenchidas com substrato comercial Basaplant®, na proporção de uma semente por célula, semeadas a aproximadamente 3 cm de profundidade.

O transplântio ocorreu quando as mudas estavam com aproximadamente 15 *Dias Após a Semeadura* (DAS); para tanto, foram selecionadas cinco mudas de amendoim para compor cada parcela experimental. A adubação, que ocorreu conforme a demanda da cultura (RAIJ et al., 1997), foi realizada por ocasião do transplântio, com os fertilizantes distribuídos uniformemente nas covas de cada parcela experimental. Após o transplântio, as plantas foram irrigadas igualmente, de forma a proporcionar um desenvolvimento inicial uniforme.

Na condução do experimento, foram realizadas as seguintes práticas de manejo cultural: controle fitossanitário de pragas e doenças, como ácaro branco (*Polyphagotarsonemus latus* Banks), lagarta mede-palmo (*Pseudoplusia includens*), tripses-do-amendoim (*Enneothrips flavens*), cercosporiose (mancha castanha), sendo que a retirada de plantas invasoras foi feita manualmente.

Tratamentos e análise de dados

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, apresentando 4 blocos e 4 níveis de reposição hídrica, no qual foram calculados com base na umidade do solo na capacidade de campo θ_{cc} de 100%; assim, os níveis foram estabelecidos em 50, 75, 100 e 125% da θ_{cc} . Para as análises de redundância (RDA) foram realizados testes de Monte Carlo baseado em 499 permutações aleatórias para cada período, produzindo os valores dep e Wilk's lambda (%), estimando assim a significância de cada correlação (Baretta et al., 2008).

Para os dados experimentais, os pressupostos de normalidade de variância foram testados usando o teste de Shapiro e Wilk (1965) e de homocedasticidade pelo teste de Levene. As correlações foram realizadas por meio de Correlações de Pearson. A comparação das médias foi realizada pelo teste de Tukey, em nível de significância de 5%. As análises foram realizadas com o software R (R Core Team 2018), v.3.3.4, utilizando os pacotes ExpDes.pt (FERREIRA et al., 2018) e ggplot2 (WICKHAM, 2009). A análise de redundância – RDA foi realizada com auxílio do software Canoco® for Windows v. 4.5.

Caracterização físico-hídrica do solo

O solo foi fertilizado de acordo com as recomendações do Boletim 100 do IAC (RAIJ et al., 1997) para a cultura do amendoim no Brasil. As adubações foram realizadas manualmente e por meio de fertirrigações, sendo as mesmas divididas em 4 aplicações.

Amostras indeformadas de solo foram coletadas para a obtenção das curvas de retenção de água no solo (CRA), por meio de mesa de tensão (-1, -2, -4 e -6 kPa) e extratores de “Richards” com placas porosas (-10, -30, -50, -100, -500, -1000 e -1500 kPa). As amostras foram retiradas em três profundidades: 20, 30 e 40 cm, representando as camadas de 0-20, 20-30 e 30-40 cm, respectivamente. Nessas mesmas camadas foram feitas determinações da densidade global (D_s), densidade das partículas (D_p) e porosidade total (α) do solo (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização físico-hídrica do solo utilizado na casa de vegetação.

Prof. cm	θ_{cc} $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	θ_{pmp} $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	CAD mm	D_s g cm^{-3}	D_p g cm^{-3}	α %	Frações granulométricas (%)		
							Areia	Silte	Argila
0 - 20	0.226	0.1058	24.92	1.53	2.65	42.30	75.1	7.80	17.10
20 - 30	0.2264	0.0983	12.81	1.50	2.65	43.40	74.5	8.00	17.50
30 - 40	0.2411	0.1123	10.88	1.69	2.64	36.00	74.4	8.60	17.00

* A caracterização física do solo foi realizada de acordo com os métodos padrão adotados para solos tropicais (Raij et al., 2001). Resumidamente, Areia, silte e Argila pelo método do Bouyoucos Hydrometer e θ_{cc} , θ_{PWP} pelo método do extrator de Richards.

Manejo da irrigação

O sistema de irrigação adotado na área experimental foi o gotejamento, utilizando tubo gotejador com emissor autocompensante. Cada parcela experimental possuía dois gotejadores com vazão de 8 L h^{-1} . Esta vazão era dividida em quatro pontos da parcela por meio de mini-estacas.

O manejo da irrigação baseou-se no monitoramento do potencial mátrico do solo; para isso, três baterias (3 repetições) compostas por três tensiômetros foram instaladas em cada parcela de referência a profundidades de 0,15 m, 0,25 m e 0,35 m, representando cada camada. Deste modo, o manejo da irrigação foi diferenciado para cada demanda hídrica requerida.

O nível de reposição hídrica igual a 100% da θ_{cc} foi estimado somando-se as reposições hídricas de água necessárias para elevar a umidade do solo até capacidade de campo em cada uma das camadas. As demais reposições hídricas aplicadas ao experimento: 50, 75 e 125% da θ_{cc} foram calculadas como frações da reposição de referência 100% θ_{cc} .

Após as leituras de tensão, os valores coletados foram transformados em potencial matricial (Ψ_m) (equação 1) da água no solo e, em seguida, a estimativa da umidade foi realizada por meio do modelo proposto por Van Genuchten (1980) (equação 2).

$$\psi_m = L_t - h_c \quad (1)$$

Em que: ψ_m - potencial matricial da água no solo (kPa); L_t - leitura do tensiômetro ou tensão da água no solo (kPa); h_c - pressão equivalente à altura da coluna d'água no tensiômetro (kPa);

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

Em que: θ (ψ_m) - umidade volumétrica em função do potencial mátrico, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; θ_r - umidade volumétrica residual do solo, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; θ_s - umidade volumétrica do solo saturado, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; m e n - parâmetros de regressão da equação, adimensionais; α - parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, em kPa^{-1} ; e ψ_m - potencial mátrico, em kPa.

Figura 1. Porcentagem média do conteúdo de água no solo (θ) nas camadas 0 - 0,40 m durante a época de irrigação (outubro a janeiro) para o nível de reposição de 100% θ_{cc} , antes de cada irrigação (a); conteúdo de água no solo (θ) seguido das irrigações (b).

Medidas realizadas nas condições experimentais

As medidas do potencial de água na folha foram feitas com câmara de pressão tipo Scholander, Modelo 3005, Soil Moisture Equipment Corporation, Santa Bárbara, CA, EUA, (SCHOLANDER et al., 1964). Foram feitas três avaliações de potencial de água na folha durante a aplicação dos níveis de reposição de água no solo. As folhas adotadas para as mensurações foram as folhas do 3º e/ou 4º par do terço superior ($n=4$) com 4 análises para cada período. As coletas foram feitas antes do amanhecer, as folhas escolhidas foram

embrulhadas em folha de alumínio e armazenadas em local com temperatura controladas por no máximo uma hora antes da amostragem.

Estimativa de produtividade

o amendoim foi avaliada,

$$P = \left(\frac{(MS \times A)}{B} \right) \div 1000 \quad (3)$$

Em que P é a Produtividade para cada tipo de material vegetal (kg ha^{-1}); MS é a Massa seca do material vegetal em cada parcela experimental (g); A é a quantidade de metros lineares por hectare, considerando o espaçamento médio de 0,90 m entre linhas (11111,11 metros lineares) e B é o comprimento da linha de plantio dentro da parcela experimental (0,60 m).

Considerando a distribuição das cinco plantas ao longo dos 0,60 m de comprimento da parcela experimental, tem-se 8,3 plantas m^{-1} , totalizando uma densidade final de 9 plantas m^{-2} .

Área foliar

A mensuração da área foliar foi realizada por meio da escolha de uma planta representativa de cada parcela experimental, da qual todas as folhas foram destacadas e inseridas individualmente no integrador de área foliar LI-COR[®] modelo LI 3100C.

Gas Exchange

As trocas gasosas (H_2O e CO_2) das plantas foram medidas com sistema de analisador de gases por infravermelho portátil (LI-6400XT, Li-cor, Lincoln, NE, USA), com as medições realizadas entre os horários de 09:00 e 12:00 horas. A concentração de CO_2 no interior da câmara do equipamento durante as medições foi fixada em $400 \pm 5 \mu\text{mol}^{-1}$, a umidade relativa mantida entre 50 e 60%. A temperatura utilizada nas mensurações foi ambiente, para determinação da densidade do fluxo de fótons fotossinteticamente ativo (DFFFA) no interior da câmara foi realizado uma análise prévia da curva de resposta fotossintética da luz de 0 e $2500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, e o valor usado proveniente da análise prévia foi $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Imagens térmicas

A temperatura da folha/dossel foi obtida por meio de imagens térmicas com câmera de infravermelho da marca Flir, modelo T640, produzindo imagens térmicas com resolução de

640 x 480 pixels com uma precisão de $\pm 0,06^\circ\text{C}$ e sensibilidade termal de $0,035^\circ\text{C}$, e faixa de temperatura de trabalho de -40°C a 2.000°C . As imagens térmicas foram tomadas em conjunto com as medidas das trocas gasosas nas folhas das plantas, a fim de observar as relações entre a temperatura foliar e as trocas de gases com o ambiente em função dos respectivos manejos de irrigação adotados para a planta. O processamento e análises termais foram realizados por meio do software Flir Tools V. 5.2.15161. As imagens zenitais foram tiradas a aproximadamente 1,0 m de distância de cada parcela experimental, no mesmo ângulo e posicionamento. No software foram selecionadas áreas da imagem de 100 x 100 pixels (aproximadamente 400 cm^2) do terço superior da planta, considerada uma porção representativa do dossel.

Mensuração dos dados meteorológicos

O monitoramento da radiação solar global (Q_g) se deu por meio de piranômetro de fotodiodo de silício (LI200X - Campbell Sci.), temperatura do ar ($^\circ\text{C}$) e umidade relativa do ar (%) com sensor Vaissala (HMP45C - Campbell Sci.) instalados no interior da casa de vegetação, com intervalo de registro de dados igual a 15 minutos (valores médios).

CWSI - Crop Water Stress Index

O Crop water stress index - CWSI utilizado é definido na Equação (4) baseada na diferença entre a temperatura do dossel e a temperatura do ar ($T_c - T_a$) sendo determinado usando a fórmula de Idso et al., (1981).

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LBI}}{(T_c - T_a)_{LBS} - (T_c - T_a)_{LBI}} \quad (4)$$

Em que: T_c é a temperatura do dossel; T_a é a temperatura média do ar; $(T_c - T_a)_{LBI}$ é a linha base de temperatura inferior, que corresponde à diferença de temperatura do ar para a cultura sem déficit hídrico, quando a resistência para a perda de água é nula ou correspondente a temperatura da superfície molhada; $(T_c - T_a)_{LBS}$ é a 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.

O índice de estresse baseado em temperatura térmica foi calculado a partir de medições feitas uma vez ao dia durante, entre às 10 – 12:00 horas em condições de céu livre

de nuvens. O CWSI tende para 0 após as irrigações e sobe progressivamente para 1, quando a água do solo está esgotada (O'SHAUGHNESSY et al., 2012). Neste trabalho, optou-se pela perspectiva empírica seguindo a metodologia de Idso et al., (IDSO et al., 1981; RAMÍREZ et al., 2015).

4.3 Resultados e discussão

Os resultados observados na Figura (2 b, c, d, e, f) apresentam um resumo do comportamento térmico do dossel da cultura do amendoim, para cada nível de reposição hídrica, além disso a Figura (1b) apresenta o potencial médio de água na folha em cada um dos níveis de reposição hídrica. O menor valor do potencial foi observado na reposição de 50% θ_{cc} com -0,96 MPa representando a menor quantidade de água na folha. A Figura 2 (g) apresenta a resposta da variação de temperatura da cultura e do ar $T_{leaf-air}$ (°C) com os níveis de reposição hídrica; as maiores variações absolutas foram observadas nos níveis de reposição de 100 e 125% da θ_{cc} , correspondendo a variação média de temperatura de -5.5 e -5.6 °C; já na condição de 50% θ_{cc} a variação de temperatura média foi de -1.07 °C. Nas Figuras 2 (h, i) são mostradas as correlações entre $T_{leaf-air}$ e CWSI; taxa de assimilação de CO₂ com temperatura do dossel do amendoim respectivamente.

Figura 2. Imagem visível (RGB) das unidade experimentais (a); Imagem térmica: temperatura e potenciais médios de água na folha Ψ_{leaf} para cada condição de manejo (b); nível de reposição hídrica de 50% (c); 75% (d); 100% (e); 125% (f); correlação entre a temperatura do dossel das plantas (T_{leaf}) menos a temperatura do ar (T_{air}) para os diferentes níveis de estresse hídrico estudados (g); correlação entre $T_{leaf-air}$ e o CWSI (h); fotossíntese líquida em função da temperatura da folha (i). As áreas sombreadas nas Figuras (h, i) indicam o intervalo de confiança de 95% para o ajuste das regressões.

A temperatura do dossel de diversas culturas de interesse agrícola tem sido usada com sucesso como um indicador de status de água de planta e como critério de seleção de plantas adaptadas as condições de estresse hídrico (RITARI; STRÖMMER, 1985; PORTER; GAWITH, 1999; EGEA et al., 2017; BIJU; FUENTES; GUPTA, 2018; KHORSANDI et al., 2018b; NELSON et al., 2018; PETRIE et al., 2019; TOMBESI et al., 2019).

As variáveis: taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), CWSI, temperatura foliar (T_{leaf}) e potencial hídrico foliar (Ψ_{leaf}), na cultura do amendoim submetido a diferentes níveis de reposição hídrica são apresentados na Figura (3). Foi possível verificar que a taxa fotossintética (Figura 3a) na condição de reposição de 100% θ_{cc} apresentou a maior taxa na fotossíntese, com assimilação média de $30,27 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; já na condição de maior nível de estresse hídrico (50% θ_{cc}), assimilação foi de apenas $20,39 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ apresentando redução de 32,61%. Já na condição com excesso de água no solo 125% θ_{cc} , o estresse hídrico proveniente de tal condição apresentou redução de 27.3% quando comparada com a reposição de 100% θ_{cc} .

A g_s (Figura 3b) apresenta as médias da condutância estomática: 0,044; 0,071; 0,134 e 0,133 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para os níveis de reposição de 50; 75; 100 e 125% θ_{cc} respectivamente. Na comparação entre o nível de 100% θ_{cc} com 50% θ_{cc} a redução foi 66%, percentual de redução duas vezes maior do que os observados na fotossíntese. Na taxa transpiratória (Figura 3c) para os níveis de reposição de 50; 75; 100 e 125% θ_{cc} os valores médios foram: 2,45; 3,48; 5,48 e 5,44 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ respectivamente; já o percentual de redução da taxa transpiratória na comparação entre o nível de 100% θ_{cc} com 50% θ_{cc} foi 55%.

O índice de estresse hídrico da cultura CWSI baseado nos valores de temperatura foliar provenientes das imagens termais e da temperatura do ar apresentou diferença significativa entre as condições de reposição hídrica como pode ser observado na (Figura. 3d). O CWSI da cultura do amendoim varia de 0 (zero) para nenhuma condição de estresse (irrigação com reposição da água do solo com 100% θ_{cc}) até 1 para a condição de máximo estresse hídrico. Vale salientar que as análises foram realizadas antes das irrigações. Os índices médios de CWSI encontrados na condição experimental foram: 0.86; 0.37; 0.11 e 0.10 para os níveis de reposição hídrica de 50; 75; 100 e 125% θ_{cc} .

Na Figura (3e) são apresentadas as temperaturas médias do dossel da cultura do amendoim; os valores de temperatura oscilaram de $33,33^\circ\text{C}$ na reposição de 50% θ_{cc} a $28,83^\circ\text{C}$ na 100% θ_{cc} , tendo um gradiente de temperatura de $4,5^\circ\text{C}$ na comparação destas duas lâminas. Vale ressaltar que os valores citados são médias de cada condição de reposição hídrica. O potencial hídrico foliar (Figura 3f) apresentou os valores médios -0.96; -0.65; -0.44 e -0.43 MPa para os níveis de reposição hídrica 50; 75; 100 e 125% θ_{cc} , respectivamente.

Figura 3. Fotossíntese líquida (A) - $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (a); condutância estomática - (g_s) $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (b) temperatura do dossel da cultura - $^{\circ}\text{C}$ (b), taxa de transpiração (E) - $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (c), índice de estresse hídrico da cultura - CWSI (d); temperatura foliar - $^{\circ}\text{C}$ (e); potencial de água na folha (Ψ_{leaf}); (f); para cultura do amendoim. Médias seguidas pela mesma letra não diferem em 5% probabilidade pelo teste de Tukey.

Em geral, a limitação da taxa fotossintética líquida em plantas estressadas com baixo nível de reposição de água no solo deve-se ao aumento da resistência estomática (SOUSA et al., 2014) e/ou por comprometimento metabólico (TAIZ; ZEIGER, 2015). No entanto, a gravidade da seca determina a magnitude relativa dos fatores que limitam a fotossíntese (VAN WYK; PRINSLOO, 2018). As plantas transpiram menos sob condições limitadas de água

no solo; como resultado, a taxa de transpiração diminuída foi observada neste estudo (NAUTIYAL et al., 2012). O potencial hídrico foliar, a taxa de transpiração e a taxa fotossintética diminuíram progressivamente com o aumento da duração do estresse hídrico no amendoim (NOWAK et al., 2010; HUSSAIN et al., 2011; SOUZA; PEREIRA; FONSECA, 2012; BIANCHI et al., 2018); comportamento semelhante foi observado neste estudo como podem ser visto na Figura (3f).

Em condições ambientais normais, as plantas transpiram por meio dos estômatos abertos e a temperatura do dossel é mantida em faixa adequada de acordo com as características da espécie (TAIZ; ZEIGER, 2015). No entanto, durante o estresse hídrico, as plantas fecham os estômatos como um mecanismo preventivo que, em última instância, aumenta o T_{leaf} (GAUR; KRISHNAMURTHY; KASHIWAGI, 2008; COSTA et al., 2019).

Outros autores também observaram uma redução significativa nas taxas de fotossíntese e condutância estomática (A e g_s) em plantas de amendoim cultivadas sob condições de seca (YOUSEFZADEH NAJAFABADI; EHSANZADEH, 2017; COSTA et al., 2019; MANDAL; THAKUR; MOHANTY, 2019).

As correlações dos valores de CWSI determinados a partir de imagens térmicas nas quatro condições de manejo (50, 75, 100 e 125% θ_{cc}) de irrigação, com fotossíntese (A - $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração (E $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e condutância estomática (g_s $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e potencial de água na folha (Ψ_{leaf} KPa) estão representados nas Figuras 3a; 3b; 3c e 3d). O CWSI como indicador de status de água baseados nas plantas de amendoim apresentou correlações significativas entre (A) com CWSI ($R^2 = 0,63$, e $p < 0.01$); as correlações do CWSI com a (g_s , E e Ψ_{leaf}) também apresentaram resposta significativa ($R^2 = 0.88$, e $p < 0.001$); ($R^2 = 0.88$, e $p < 0.001$); ($R^2 = 0.88$, e $p < 0.001$) respectivamente.

O aumento na temperatura do ar e a falta de água limitam a produção de amendoim nas regiões tropicais e subtropicais com destaque para a região sudeste do Brasil, onde são encontrados os maiores produtores dessa oleaginosa (Aleman and Marques, 2016). Este é particularmente o caso quando as ondas de calor associadas às baixas precipitações atingem e/ou quando a irrigação não é possível e/ou mal gerida. Portanto, uma melhor compreensão das respostas das plantas de amendoim ao estresse hídrico e térmico, combinada com um melhor monitoramento das culturas baseado em padrões térmicos, contribuirá para otimizar a irrigação e o manejo dessa cultura (KHORSANDI et al., 2018b).

As correlações observadas nesse trabalho mostram a relevância do monitoramento térmico por meio de índice do estresse hídrico de plantas de amendoim para identificar risco no manejo da cultura. O uso de índices térmicos como CWSI ajuda a minimizar a influência de condições climáticas variáveis nas medidas termográficas (O'SHAUGHNESSY et al., 2011; BALLESTER et al., 2013a; GONZALEZ-DUGO; ZARCO-TEJADA; FERERES, 2014b; SEZEN et al., 2014; GARCÍA-TEJERO et al., 2017a, 2018b). Assim os resultados encontrados no CWSI se correlacionam com as principais características ecofisiológicas, como Ψ_{leaf} , g_s e A , ao longo do período de produção da cultura. Isso indica que o CWSI pode ser usado como um indicador térmico simples do estado da água / troca de gás foliar no amendoim; resultados similares foram observados por García-Tejero et al. (2016) em videiras na Espanha.

Figura 4. Correlações entre o índice de estresse hídrico da cultura - CWSI com a assimilação de CO_2 com (a); condutância estomática (b); transpiração (c); potencial de água na folha Ψ_{leaf} (d). As áreas sombreadas representam nas Figuras intervalo de confiança de 95% para o ajuste das regressões.

A Figura 5a pode-se observar análise de regressão entre o CWSI e o rendimento da cultura (Mg ha^{-1}), que mostrou correlação negativa e significativa, explicando 58% ($R^2=0.58$, $p<0.01$) da variação no rendimento do amendoim. A Figura 5b ressalta uma visão geral da área experimental, com suas respectivas condições de manejo no qual está sendo destacado

os valores de temperatura foliar em algumas unidades experimentais, representados pelos Sp1 – 28,6; Sp2 – 31,9; Sp3 – 28,6; Sp4 – 32,6 e Sp5 – 33,6 °C e os valores de produtividade média para cada nível de reposição hídrica. A maior produtividade foi observada no nível de reposição de 100% θ_{cc} com valor de 3,973 Mg ha⁻¹, já a menor produtividade foi resultante do nível 50% θ_{cc} correspondendo a 2,417 Mg ha⁻¹, em termos comparativos isso representa uma redução de 39,16% da produtividade comparando a reposição hídrica de 50 com a de 100 % θ_{cc} .

É importante ressaltar que os valores aqui encontrados com o nível de reposição hídrica de 100% θ_{cc} representam um adicional de 2,44 vezes a produtividade nacional na safra 2017/18 que foi de 1627 kg ha⁻¹ (CONAB, 2019). Em estudos realizados pela Embrapa no estado de São Paulo com amendoim variedade Tatu foi encontrado rendimento de 2392 kg ha⁻¹ e 3414 kg ha⁻¹ com a variedade Tapuã em condições experimentais irrigadas (ALEMAN; MARQUES, 2016). Já os rendimentos encontrados nesse estudo são similares aos valores encontrados em experimento na região da Turquia (SEZEN et al., 2019).

Foram analisadas as correlações da variação de temperatura da cultura e do ar $T_{leaf-air}$ com o rendimento (c); área foliar total com CWSI (d); e níveis de reposição hídrica com rendimento (e), as quais mostraram correlação significativa ($R^2=0.53$, $p<0.01$); ($R^2=0.51$, $p<0.01$); ($R^2=0.54$, $p<0.01$), respectivamente.

Na figura (5e) são apresentadas médias para o percentual de óleo de amendoim em cada nível de reposição hídrica; os valores foram iguais a 48,77; 48,56; 48,48 e 49,23% para os níveis de reposição hídrica 50, 75, 100 e 125% θ_{cc} respectivamente. Os resultados aqui mostrados não apresentaram diferença significativa ($p<0,05$). Resultados semelhantes foram observados em estudos com amêndoas submetidas a diferentes estratégias de irrigação em área localizada em Dos Hermanas, Sevilha, Espanha (LIPAN et al., 2019b)

Yada; Lapsley; Huang, (2011) relatam que tanto a quantidade quanto a qualidade do conteúdo lipídico são altamente dependentes do genótipo, da área geográfica, das condições climáticas da estação de crescimento e da água aplicada. A irrigação geralmente foi encontrada para ter efeitos limitados sobre a quantidade e qualidade lipídica; no entanto, esses resultados aqui encontrados contradizem em parte, mostrando diferenças significativas apenas no fator quantidade.

O estresse hídrico em plantas de amendoim pode ser o resultado de um único parâmetro ou de uma combinação de condições ambientais (por exemplo, temperatura do ar,

umidade relativa do ar, intensidade da radiação solar, velocidade do ar) condições de raiz (por exemplo, água disponível na raiz, condutividade eléctrica na zona da raiz), microclima e características genéticas das plantas. A avaliação da demanda de água dessas plantas é muito importante para a aplicação de estratégias razoáveis de gestão de recursos hídricos e para a realização de possíveis economias de água e altas eficiências do seu uso em escalas regionais, para o qual são utilizadas ferramentas como índices de estresse hídrico associados aos rendimentos das culturas (FANG et al., 2010).

Figura 5. Correlação CWSI e produtividade (Mg de grão ha⁻¹) (a); imagem térmica do experimento, Sp1, Sp2, Sp3, Sp4, Sp5 são valores de temperatura em cada ponto marcado na imagem (b); correlação produtividade com T_{leaf-air} (c); área foliar total (m²) e CWSI (d); produtividade com níveis de reposições hídricas (e); percentual de óleo de tratamento (f); as áreas sombreadas representam intervalo de confiança de 95% para o ajuste das regressões.

Vale salientar que o estresse térmico e o hídrico têm múltiplos impactos negativos no rendimento das culturas, incluindo a redução da fotossíntese foliar como foram observados na Figura (3ª) e aumentos das taxas de senescência foliar. Mais criticamente para a determinação do rendimento do amendoim, no entanto, são os efeitos relatados da diminuição do número de grãos, quando o estresse térmico ocorre antes ou em torno da antese, e redução do peso dos grãos quando ocorre durante o enchimento de grãos (PORTER;

GAWITH, 1999; DOLFERUS; JI; RICHARDS, 2011; FAYE et al., 2018). Enquanto a falta de água ou a redução do nível de reposição hídrica no solo representa um processo que se desenvolve e se intensifica lentamente, o estresse térmico pode ocorrer de forma muito abrupta e até episódios curtos de alta temperatura podem causar um grave declínio no rendimento de grãos (RAJALA et al., 2009).

É importante entender a resposta de culturas específicas ao estresse hídrico porque as respostas fisiológicas das plantas ao estresse hídrico variam com as espécies, o tipo de solo, os nutrientes e o clima. A resistência estomática, que regula muitos processos vegetais (assimilação CO_2 , respiração e transpiração, etc.) como o CWSI, pode ser usada para determinar o uso da água do amendoim, o estado da água e a resposta ao ambiente de crescimento da cultura (ERDEM et al., 2010).

Por meio de análise de variância o rendimento de óleo extraído dos grãos de amendoim foi maior no manejo de 100% θ_{cc} , com média de 1928 L ha^{-1} ; já a estratégia de 50% θ_{cc} apresentou o menor rendimento de óleo, com 1180 L ha^{-1} ou seja, redução de 38,7% no rendimento total de óleo quando comparado com o tratamento de irrigação plena. Os níveis de reposição hídrica de 75 e 125% θ_{cc} obtiveram rendimentos similares com 1510 e 1634 L ha^{-1} , respectivamente, como pode ser observado na Figura 6a. Relações entre a variação de temperatura $T_{\text{leaf-air}}$ ($^{\circ}\text{C}$) e o rendimento de óleo de amendoim submetidos às estratégias de manejos de irrigação ao longo do período experimental, são apresentados na Figura 6b. A análise de regressão entre o rendimento de óleo e $T_{\text{leaf-air}}$ ($^{\circ}\text{C}$) mostrou correlação negativa e significativa, explicando 53% ($R^2 = 0.53$, $p < 0.01$) da variação no rendimento do óleo do amendoim.

Figura 6. Produtividade de óleo em cada estratégia de manejo (a), Médias seguidas pela mesma letra não diferem em 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; Correlação da produtividade de óleo ($L\ ha^{-1}$) com a variação da temperatura da planta e do ar $T_{leaf-air}$ ($^{\circ}C$) em (b); a área sombreadas representa na Figura (b) intervalo de confiança de 95% para o ajuste das regressões.

A Figura 6 mostra as tendências de temperatura da copa das plantas de amendoim; os níveis de reposição hídrica tiveram um efeito considerável sobre a temperatura foliar; quanto maior o suprimento de água das plantas, menor a temperatura da folha e maior a amplitude térmica com o ambiente. Como resposta, os rendimentos de óleo mostraram-se significativamente melhores quando a variação $T_{leaf-air}$ ($^{\circ}C$) foi maior. Vale salientar que na condição de estresse por excesso de água com o 125% θ_{cc} foram observados rendimentos muito próximos aos valores encontrados na reposição de 75% θ_{cc} . Isso pode ser explicado pelo comportamento fisiológico da planta: se uma planta está passando por estresse hídrico, o estômato tende a fechar e leva a uma redução na transpiração e aumento da temperatura da folha (BALLESTER et al., 2013b; KHORSANDI et al., 2018b; TORRES et al., 2019; YU et al., 2019). Resultados semelhantes foram observados em estudo realizado, com plantas de gergelim em casa de vegetação (SEZEN et al., 2019); Citros (BALLESTER et al., 2013b); vinhedos (COSTA et al., 2019); e café (CRAPARO et al., 2017).

A produtividade da água na produção de óleo de amendoim (PAO) irrigado é apresentada na Figura 7a. Os maiores valores de produtividade da água na produção de óleo foram verificados no nível de reposição hídrica de 50% θ_{cc} , com valores de $0,256\ L^{-1}\ m^{-3}$ os quais não apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$) entre os níveis de 75 e 100% θ_{cc} , com

produtividade de água para produção de óleo de 0,234 e 0,226 $\text{L}^{-1} \text{m}^{-3}$ respectivamente. O nível de reposição 125% θ_{cc} diferenciou-se dos demais obtendo a menor média de PAO com 0,155 $\text{L}^{-1} \text{m}^{-3}$, ou seja, maior volume de água aplicado causando lixiviação de nutrientes que por sua vez implica baixa atividade fisiológica como fotossíntese, transpiração e condutância estomática resultando em redução da produtividade. Vale ressaltar que quanto menor o volume de água aplicado para cada litro de óleo produzida, melhor é a produtividade da água. Estudos realizados com batata e tomate corroboram com dados aqui apresentados (BADR et al., 2010; DE PASCALE et al., 2011; SANTOS et al., 2019).

A irrigação por déficit pode ser uma alternativa para economizar água em áreas com escassez de água (INES; GUPTA; LOOF, 2002; STEDUTO et al., 2012; SANTOS et al., 2019), como são mostrados na Figura 7a e b. No entanto, como não foi verificada diferença significativa na PAO nos níveis de 50, 75 e 100% θ_{cc} , preconiza-se observar detalhadamente os níveis de produtividade em função das reposições hídricas; para o presente trabalho o melhor nível de reposição hídrica associado à maior produtividade foi no nível de 100% θ_{cc} ; o mesmo apresentou incremento de quase 40% na produtividade quando comparado com o nível de 50% θ_{cc} .

Já na produtividade da água para a produção de grãos-PAG (Figura 7b) foram observadas PAG variando de 0,525 $\text{kg}^{-1} \text{m}^{-3}$ para o tratamento 50% θ_{cc} e 0,318 $\text{kg}^{-1} \text{m}^{-3}$ com o nível de 125% θ_{cc} . Os resultados observados corroboram com os valores encontrados por Steduto et al., (2012). Vale salientar que o estresse hídrico por excesso de água, além de trazer resultados negativos na fisiologia da planta, como foi observado neste estudo, também apresentou baixa produtividade da água tanto para produção grãos quanto para produção de óleo como podem ser vistos nas Figuras 7 (a, b).

Figura 7. Produtividade da água na produção óleo de amendoim (a) em ($\text{L}^{-1} \text{m}^{-3}$); produtividade da água para produção de grãos (b) em ($\text{kg}^{-1} \text{m}^{-3}$).

A Figura 8 são apresentadas as respostas das análises multivariadas – (Análise de redundância – RDA) que apresentam dois tipos de informações: variáveis exploratórias, indicadas pelos vetores vermelhos e variáveis de respostas, representadas pelos vetores pretos de todos os dados em cada um dos tratamentos (níveis de reposição hídrica), no qual as variáveis: eficiência do uso da água, eficiência intrínseca do uso da água (WUEi), CWSI e $T_{leaf-air}$, T_{leaf} , as quais apresentaram contribuições similares no tratamento estressado (50% θ_{cc}). Verifica-se que existe uma alta correlação entre estas variáveis, demonstrado pela proximidade dos vetores; assim, estas variáveis podem ser usadas para identificar o déficit hídrico na cultura de amendoim, o que representa um auxílio significativo na identificação do estresse hídrico.

A RDA resultante dos tratamentos de níveis de reposição hídrica, estão de acordo com os critérios estabelecidos por Sneath; Sokal, (1973), que afirmaram que em análise multivariada dos tipos PCA e RDA devem explicar pelo menos 70% do total de variância dos dados observados.

Figura 8. Análise de redundância (RDA) fotossíntese líquida (A); condutância estomática (g_s); transpiração (E); Crop Water Stress Index (CWSI); temperatura do ar (T_{air}); temperatura da cultura – temperatura do ar (T_c-T_a), temperatura da cultura/folha (T_{leaf}), eficiência do uso da água (WUE); eficiência intrínseca de uso da água (WUEi).

4.4 Conclusões

A hipótese de que a temperatura foliar oriunda das imagens térmicas pode servir como ferramenta alternativa para monitorar o status hídrico das plantas, especialmente quando esta cultura é submetida a estratégias de irrigação por déficit, é verdadeira. Os

resultados mostraram que a termografia é um método rápido e preciso para mensuração remota em plantas de amendoim.

A termografia por infravermelho apresenta-se como uma ferramenta alternativa, não invasiva na agricultura moderna, abordando a melhoria na gestão dos recursos hídricos, que facilita a programação da irrigação e o monitoramento da água nas plantas de amendoim.

As correlações entre as trocas gasosas e as respostas térmicas da cultura submetida a níveis de reposição hídrica apresentaram bons resultados, tendo a variação temperatura foliar e do ar $T_{\text{leaf-air}}$ como a base para o entendimento do comportamento fisiológico da planta.

As melhores condições de manejo hídrico para mitigar os efeitos negativos do estresse sobre o desempenho agrônômico do amendoim foi o nível de reposição de 100% θ_{cc} .

Acknowledgments

Este trabalho recebeu apoio do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processes nº 2012/50083-7 and USP - ETH-FAPESP:30761).

Referencias

ALEMAN, C. C.; MARQUES, P. A. A. MANEJO E VIABILIDADE ECONÔMICA DA IRRIGAÇÃO NO CULTIVO DE AMENDOIM. p. 29–37, 2016.

BADR, M. A.; ABOU HUSSEIN, S. D.; EL-TOHAMY, W. A.; GRUDA, N. Efficiency of Subsurface Drip Irrigation for Potato Production Under Different Dry Stress Conditions. **Gesunde Pflanzen**, v. 62, n. 2, p. 63–70, 4 nov. 2010. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10343-010-0222-x>>. Acesso em: 9 jun. 2019.

BALLESTER, C.; JIMÉNEZ-BELLO, M. A.; CASTEL, J. R.; INTRIGLIOLO, D. S. Usefulness of thermography for plant water stress detection in citrus and persimmon trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 168, p. 120–129, 15 jan. 2013a. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192312002572>>. Acesso em: 23 ago. 2018.

BALLESTER, C.; JIMÉNEZ-BELLO, M. A.; CASTEL, J. R.; INTRIGLIOLO, D. S. Usefulness of thermography for plant water stress detection in citrus and persimmon trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 168, p. 120–129, 15 jan. 2013b. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192312002572>>. Acesso em: 26 maio. 2019.

BEGUM, M. K.; ALAM, M. R.; ISLAM, M. S.; AREFIN, M. S. Effect of Water Stress on Physiological Characters and Juice Quality of Sugarcane. **Sugar Tech**, v. 14, n. 2, p. 161–167, 2012.

BIANCHI, D.; GROSSI, D.; TINCANI, D. T. G.; SIMONE DI LORENZO, G.; BRANCADORO, L.; RUSTIONI, L. Multi-parameter characterization of water stress tolerance in Vitis hybrids for new rootstock selection. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 132, p. 333–340, nov. 2018.

BIJU, S.; FUENTES, S.; GUPTA, D. The use of infrared thermal imaging as a non-destructive screening tool for identifying drought-tolerant lentil genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 127, p. 11–24, 1 jun. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0981942818301207?via%3Dihub>>. Acesso em: 1 jun. 2019.

BRASILEIRA, A.; AGRÍCOLA, D. E.; ABEAS, S.; SOUZA, J. K. C. De; SILVA, S.; NETO, J. D.; SILVA, M. B. R.; TEODORO, I. Revista Educação Agrícola Superior IMPORTÂNCIA DA IRRIGAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO NORDESTE DO BRASIL IMPORTANCE OF IRRIGATION FOR THE PRODUCTION OF SUGARCANE IN THE NORTHEAST OF BRAZIL. p. 133–140, 2012.

BROWN, H. T.; ESCOMBE, F. Researches on some of the Physiological Processes of Green Leaves, with Special Reference to the Interchange of Energy between the Leaf and Its Surroundings. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 76, n. 507, p. 29–111, 22 abr. 1905. Disponível em: <<http://rspb.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rspb.1905.0002>>. Acesso em: 25 mar. 2019.

CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A.; PERES, L. E. P. **Manual de fisiologia vegetal : teoria e prática**. Ed. 1. ed. Piracicaba: Ceres, 2005.

ÇOLAK, Y. B.; YAZAR, A.; ÇOLAK, İ.; AKÇA, H.; DURAKTEKIN, G. Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for Eggplant under Varying Irrigation Regimes Using Surface and Subsurface Drip Systems. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 4, p. 372–382, 2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210784315001059>>.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. 2017. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_01_17_14_51_54_boletim_cafe_-_janeiro_de_2017.pdf>. Acesso em: 20 set. 2017.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - Conab - Safra Brasileira de Grãos. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 27 maio. 2019.

COSTA, J. M.; EGIPTO, R.; SÁNCHEZ-VIROSTA, A.; LOPES, C. M.; CHAVES, M. M. Canopy and soil thermal patterns to support water and heat stress management in vineyards. **Agricultural Water Management**, v. 216, p. 484–496, 1 maio 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377418307133#bib0125>>. Acesso em: 25 mar. 2019.

CRAPARO, A. C. W.; STEPPE, K.; VAN ASTEN, P. J. A.; LÄDERACH, P.; JASSOGNE, L. T. P.; GRAB, S. W. Application of thermography for monitoring stomatal conductance of Coffea arabica under different shading systems. **Science of the Total Environment**, v. 609, p. 755–763, 2017.

DE PASCALE, S.; COSTA, L. D.; VALLONE, S.; BARBIERI, G.; MAGGIO, A. Increasing water use efficiency in vegetable crop production: From plant to irrigation systems efficiency. **HortTechnology**, v. 21, n. 3, p. 301–308, 2011.

DEERY, D. M.; REBETZKE, G. J.; JIMENEZ-BERNI, J. A.; JAMES, R. A.; CONDON, A. G.; BOVILL, W. D.; HUTCHINSON, P.; SCARROW, J.; DAVY, R.; FURBANK, R. T. Methodology for High-Throughput Field Phenotyping of Canopy Temperature Using Airborne Thermography. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1808, 6 dez. 2016. Disponível em: <<http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2016.01808/full>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

DOLFERUS, R.; JI, X.; RICHARDS, R. A. Abiotic stress and control of grain number in cereals. **Plant Science**, v. 181, n. 4, p. 331–341, 1 out. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168945211001634?via%3Dihub>>. Acesso em: 27 maio. 2019.

EGEA, G.; PADILLA-DÍAZ, C. M.; MARTINEZ-GUANTER, J.; FERNÁNDEZ, J. E.; PÉREZ-RUIZ, M. Assessing a crop water stress index derived from aerial thermal imaging and infrared thermometry in super-high density olive orchards. **Agricultural Water Management**, v. 187, p. 210–221, 1 jun. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037837741730121X#fig0015>>. Acesso em: 10 dez. 2018.

ERCIN, A. E.; HOEKSTRA, A. Y. Water footprint scenarios for 2050: A global analysis. **Environment International**, v. 64, p. 71–82, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.019>>.

ERDEM, Y.; ARIN, L.; ERDEM, T.; POLAT, S.; DEVECI, M.; OKURSOY, H.; GÜLTAŞ, H. T. Crop water stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (Brassica oleracea L. var. italica). **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 1, p. 148–156, 1 dez. 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377410002805>>. Acesso em: 27 maio. 2019.

FANG, Q. X.; MA, L.; GREEN, T. R.; YU, Q.; WANG, T. D.; AHUJA, L. R. Water resources and water use efficiency in the North China Plain: Current status and agronomic management options. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 8, p. 1102–1116, 1 ago. 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377410000260>>. Acesso em: 27 maio. 2019.

FAO. **Statistics | FAO | Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <<http://www.fao.org/statistics/en/>>. Acesso em: 21 set. 2017.

FAOSTAT. **Data - dataset - Crops, National Production**.

FAYE, B.; WEBBER, H.; DIOP, M.; MBAYE, M. L.; OWUSU-SEKYERE, J. D.; NAAB, J. B.; GAISER, T. Potential impact of climate change on peanut yield in Senegal, West Africa. **Field Crops Research**, v. 219, p. 148–159, 15 abr. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429017311565#fig0010>>. Acesso em: 27 maio. 2019.

FERREIRA, B.; CAVALCANTI, P.; ALVES, D.; MAINTAINER, N.; FERREIRA, E. B. Title Pacote Experimental Designs (Portuguese). 2018. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/ExpDes.pt/ExpDes.pt.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2018.

FLETCHER, S. M.; SHI, Z. An Overview of World Peanut Markets. **Peanuts**, p. 267–287, 1 jan. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781630670382000101>>. Acesso em: 27 maio. 2019.

GAJIĆ, B.; KRESOVIĆ, B.; TAPANAROVA, A.; ŽIVOTIĆ, L.; TODOROVIĆ, M. Effect of irrigation regime on yield, harvest index and water productivity of soybean grown under different precipitation conditions in a temperate environment. **Agricultural Water Management**, v. 210, p. 224–231, 30 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377418303147>>. Acesso em: 12 mar. 2019.

GARCÍA-TEJERO, I. F.; COSTA, J. M.; EGIPTO, R.; DURÁN-ZUAZO, V. H.; LIMA, R. S. N.; LOPES, C. M.; CHAVES, M. M. Thermal data to monitor crop-water status in irrigated Mediterranean viticulture. **Agricultural Water Management**, v. 176, p. 80–90, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.008>>.

GARCÍA-TEJERO, I. F.; GUTIÉRREZ-GORDILLO, S.; ORTEGA-ARÉVALO, C.; IGLESIAS-CONTRERAS, M.; MORENO, J. M.; SOUZA-FERREIRA, L.; DURÁN-ZUAZO, V. H. Thermal imaging to monitor the crop-water status in almonds by using the non-water stress baselines. **Scientia Horticulturae**, v. 238, p. 91–97, ago. 2018a. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304423818302942>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

GARCÍA-TEJERO, I. F.; GUTIÉRREZ-GORDILLO, S.; ORTEGA-ARÉVALO, C.; IGLESIAS-CONTRERAS, M.; MORENO, J. M.; SOUZA-FERREIRA, L.; DURÁN-ZUAZO, V. H. Thermal imaging to monitor the crop-water status in almonds by using the non-water stress baselines. **Scientia Horticulturae**, v. 238, p. 91–97, ago. 2018b.

GARCÍA-TEJERO, I. F.; HERNÁNDEZ, A.; PADILLA-DÍAZ, C. M.; DIAZ-ESPEJO, A.; FERNÁNDEZ, J. . Assessing plant water status in a hedgerow olive orchard from thermography at plant level. **Agricultural Water Management**, v. 188, p. 50–60, 1 jul. 2017a. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377417301269#bib0235>>. Acesso em: 23 ago. 2018.

GARCIA-TEJERO, I. F.; HERNÁNDEZ, A.; PADILLA-DÍAZ, C. M.; DIAZ-ESPEJO, A.; FERNÁNDEZ, J. E. Assessing plant water status in a hedgerow olive orchard from thermography at plant level. **Agricultural Water Management**, v. 188, p. 50–60, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.004>>.

GARCÍA-TEJERO, I. F.; HERNÁNDEZ, A.; PADILLA-DÍAZ, C. M.; DIAZ-ESPEJO, A.; FERNÁNDEZ, J. E. Assessing plant water status in a hedgerow olive orchard from thermography at plant level. **Agricultural Water Management**, v. 188, p. 50–60, 2017b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.004>>.

GAUR, P. M.; KRISHNAMURTHY, L.; KASHIWAGI, J. Improving Drought-Avoidance Root Traits in Chickpea (*Cicer arietinum* L.) -Current Status of Research at ICRISAT. **Plant Production Science**, v. 11, n. 1, p. 3–11, 3 jan. 2008. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1626/pps.11.3>>. Acesso em: 2 jun. 2019.

GONZALEZ-DUGO, V.; ZARCO-TEJADA, P. J.; FERERES, E. Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 198–199, p. 94–104, 2014a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.08.003>>.

GONZALEZ-DUGO, V.; ZARCO-TEJADA, P. J.; FERERES, E. Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 198–199, p. 94–104, nov. 2014b.

GONZALEZ-DUGO, V.; ZARCO-TEJADA, P. J.; FERERES, E. Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 198–199, p. 94–104, 1 nov. 2014c. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192314001841>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

GONZALEZ-DUGO, V.; ZARCO-TEJADA, P. J.; FERERES, E. Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 198–199, p. 94–104, 1 nov. 2014d. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192314001841#bib0125>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

HAMMONS, R. O.; HERMAN, D. Origin and Early History of the Peanut. **Peanuts**, p. 1–26, 1 jan. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781630670382000010>>. Acesso em: 24 mar. 2019.

HUSSAIN, S. S.; ALI, M.; AHMAD, M.; SIDDIQUE, K. H. M. Polyamines: Natural and engineered abiotic and biotic stress tolerance in plants. **Biotechnology Advances**, v. 29, n. 3, p. 300–311, 2011.

IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J. J.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. **Agricultural Meteorology**, v. 24, p. 45–55, 1981.

IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L.; WALKER, G. K.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J. A generalization of the stress-degree-day concept of yield prediction to accommodate a diversity of crops. **Agricultural Meteorology**, v. 21, n. 3, p. 205–211, 1980.

INES, A. V. .; GUPTA, A. Das; LOOF, R. Application of GIS and crop growth models in estimating water productivity. **Agricultural Water Management**, v. 54, n. 3, p. 205–225, 2 abr. 2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377401001731#FIG3>>. Acesso em: 9 jun. 2019.

JACKSON, R. D.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; PINTER, P. J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water Resources Research**, v. 17, n. 4, p. 1133–1138, 1981.

JACKSON, R. D.; KUSTAS, W. P.; CHOUDHURY, B. J. A reexamination of the crop water stress index. **Irrigation Science**, v. 9, n. 4, p. 309–317, 1988.

JONES, H. G. Application of Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Physiology and Ecophysiology. In: [s.l.: s.n.]p. 107–163.

JONES, H. G.; SERRAJ, R.; LOVEYS, B. R.; XIONG, L.; WHEATON, A.; PRICE, A. H. Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. **Functional Plant Biology**, v. 36, n. 11, p. 978–989, 2009.

KHANAL, S.; FULTON, J.; SHEARER, S. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 139, p. 22–32, jun. 2017.

KHORSANDI, A.; HEMMAT, A.; MIREEI, S. A.; AMIRFATTAHI, R.; EHSANZADEH, P. Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions. **Agricultural Water Management**, v. 204, p. 222–233, maio 2018a. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377418303573>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

KHORSANDI, A.; HEMMAT, A.; MIREEI, S. A.; AMIRFATTAHI, R.; EHSANZADEH, P. Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions. **Agricultural Water Management**, v. 204, p. 222–233, 31 maio 2018b. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377418303573>>. Acesso em: 26 maio. 2019.

KLEM, K.; ZÁHORA, J.; ZEMEK, F.; TRUNDA, P.; TŮMA, I.; NOVOTNÁ, K.; HODAŇOVÁ, P.; RAPANTOVÁ, B.; HANUŠ, J.; VAVŘÍKOVÁ, J.; HOLUB, P. Interactive effects of water deficit and nitrogen nutrition on winter wheat. Remote sensing methods for their detection. **Agricultural Water Management**, v. 210, p. 171–184, nov. 2018.

LAPIDOT, O.; IGNAT, T.; RUD, R.; ROG, I.; ALCHANATIS, V.; KLEIN, T. Use of thermal imaging to detect evaporative cooling in coniferous and broadleaved tree species of the Mediterranean maquis. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 271, p. 285–294, 15 jun. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192319300656#fig0020>>. Acesso em: 26 mar. 2019.

LAUNIO, C. C.; LUIS, J. S.; ANGELES, Y. B. Factors influencing adoption of selected peanut protection and production technologies in Northern Luzon, Philippines. **Technology in Society**, v. 55, p. 56–62, 1 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160791X18300174#bib15>>. Acesso em: 24 mar. 2019.

LIPAN, L.; MARTÍN-PALOMO, M. J.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, L.; CANO-LAMADRID, M.; SENDRA, E.; HERNÁNDEZ, F.; BURLÓ, F.; VÁZQUEZ-ARAÚJO, L.; ANDREU, L.; CARBONELL-BARRACHINA, Á. A. Almond fruit quality can be improved by means of deficit irrigation strategies. **Agricultural Water Management**, v. 217, p. 236–242, 20 maio 2019a. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037837741831970X>>. Acesso em: 25 mar. 2019.

LIPAN, L.; MARTÍN-PALOMO, M. J.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, L.; CANO-LAMADRID, M.; SENDRA, E.; HERNÁNDEZ, F.; BURLÓ, F.; VÁZQUEZ-ARAÚJO, L.; ANDREU, L.; CARBONELL-BARRACHINA, Á. A. Almond fruit quality can be improved by means of deficit irrigation strategies. **Agricultural Water Management**, v. 217, p. 236–242, 20 maio 2019b. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037837741831970X>>. Acesso em: 12 mar. 2019.

MAHDAVI, S. M.; NEYSHABOURI, M. R.; FUJIMAKI, H.; MAJNOONI HERIS, A. Coupled heat and moisture transfer and evaporation in mulched soils. **Catena**, v. 151, p. 34–48, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.010>>.

MANDAL, K. G.; THAKUR, A. K.; MOHANTY, S. Paired-row planting and furrow irrigation increased light interception, pod yield and water use efficiency of groundnut in a hot sub-humid climate. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 968–977, 1 mar. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377418319516#bib0040>>. Acesso em: 24 mar. 2019.

MARTINS, L. M.; SANT'ANA, A. S.; FUNGARO, M. H. P.; SILVA, J. J.; NASCIMENTO, M. da S. do; FRISVAD, J. C.; TANIWAKI, M. H. The biodiversity of *Aspergillus* section *Flavi* and aflatoxins in the Brazilian peanut production chain. **Food Research International**, v. 94, p. 101–107, 1 abr. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996917300583#bb0015>>. Acesso em: 25 mar. 2019.

NAUTIYAL, P. C.; RAVINDRA, V.; RATHNAKUMAR, A. L.; AJAY, B. C.; ZALA, P. V. Genetic variations in photosynthetic rate, pod yield and yield components in Spanish groundnut cultivars during three cropping seasons. **Field Crops Research**, v. 125, p. 83–91, 18 jan. 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429011002747?via%3Dihub>>. Acesso em: 3 jun. 2019.

NELSON, W. C. D.; HOFFMANN, M. P.; VADEZ, V.; ROETTER, R. P.; WHITBREAD, A. M. Testing pearl millet and cowpea intercropping systems under high temperatures. **Field Crops Research**, v. 217, p. 150–166, mar. 2018.

NOWAK, M.; KLEINWÄCHTER, M.; MANDERSCHIED, R.; WEIGEL, H. J.; SELMAR, D. Drought stress increases the accumulation of monoterpenes in sage (*Salvia officinalis*), an effect that is compensated by elevated carbon dioxide concentration *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2010. .

O'SHAUGHNESSY, S. A.; EVETT, S. R.; COLAIZZI, P. D.; HOWELL, T. A. Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 10, p. 1523–1535, 1 ago. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377411001119>>. Acesso em: 23 ago. 2018.

O'SHAUGHNESSY, S. A.; EVETT, S. R.; COLAIZZI, P. D.; HOWELL, T. A. A crop water stress index and time threshold for automatic irrigation scheduling of grain sorghum. **Agricultural Water Management**, v. 107, p. 122–132, maio 2012.

O TAVARES, T. DE; DAMASCENO, A. F.; VOLTARELLI, M. A.; DA SILVA, R. P.; A FURLANI, C. E. EFFECTIVE POWER AND HOURLY FUEL CONSUMPTION DEMANDED BY SET TRACTOR-COFFEE HARVESTER IN FUNCTION OF ADEQUACY TRACTOR BALLASTING. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering Agríc. Jaboticabal**, v. 37, n. 4, 2017. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v37n4/1809-4430-eagri-37-04-0699.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2017.

PADHI, J.; MISRA, R. K.; PAYERO, J. O. Estimation of soil water deficit in an irrigated cotton field with infrared thermography. **Field Crops Research**, v. 126, p. 45–55, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2011.09.015>>.

PETRIE, P. R.; WANG, Y.; LIU, S.; LAM, S.; WHITTY, M. A.; SKEWES, M. A. The accuracy and utility of a low cost thermal camera and smartphone-based system to assess grapevine water status. **Biosystems Engineering**, v. 179, p. 126–139, 1 mar. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511018305270>>. Acesso em: 25 mar. 2019.

PORTER, J. R.; GAWITH, M. Temperatures and the growth and development of wheat: a review. **European Journal of Agronomy**, v. 10, n. 1, p. 23–36, 1 jan. 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030198000471?via%3Dihub>>. Acesso em: 27 maio. 2019.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Boletim técnico N° 100** (I. A. C. (IAC), Ed.). Campinas (SP Brasil): Instituto Agrônômico-Fundação (IAC), 1997. .

RAJALA, A.; HAKALA, K.; MÄKELÄ, P.; MUURINEN, S.; PELTONEN-SAINIO, P. Spring wheat response to timing of water deficit through sink and grain filling capacity. **Field Crops Research**, v. 114, n. 2, p. 263–271, 10 nov. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429009002147?via%3Dihub>>. Acesso em: 27 maio. 2019.

RAMÍREZ, A. J. F.; COELHO, R. D.; PIZANI, M. A. M.; SILVA, C. J. da. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTRESSE HÍDRICO EM TOMATEIROS CEREJA (*Lycopersicum Solanum* var. *cerasiforme*.) COM CÂMARA INFRAVERMELHA. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 9, n. 4, p. 218–224, 2015. Disponível em: <http://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/356/pdf_224>.

RAY D. JACKSON. Canopy Temperature and Crop Water Stress. **Advances in Irrigation**, v. 1, p. 43–85, 1 jan. 1982. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780120243013500095>>. Acesso em: 21 set. 2017.

REDDY, C. R.; REDDY, S. R. Scheduling irrigation for peanuts with variable amounts of available water. **Agricultural Water Management**, v. 23, n. 1, p. 1–9, 1 mar. 1993. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378377493900164>>. Acesso em: 25 mar. 2019.

REDDY, T. Y.; REDDY, V. R.; ANBUMOZHI, V. Physiological responses of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) to drought stress and its amelioration: a critical review. **Plant Growth Regulation**, v. 41, n. 1, p. 75–88, 2003. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1023/A:1027353430164>>. Acesso em: 25 mar. 2019.

RITARI, A.; STRÖMMER, E. Determining the temperature and water vapour pressure gradient of the ambient air using a reversing two-sensor system. An application of energy balance measurements in a clearfelled and prescribed burnt area. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 35, n. 1–4, p. 255–265, out. 1985.

SANTOS, L. C.; COELHO, R. D.; BARBOSA, F. S.; LEAL, D. P. V.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; BARROS, T. H. S.; LIZCANO, J. V.; RIBEIRO, N. L. Influence of deficit irrigation on accumulation and partitioning of sugarcane biomass under drip irrigation in commercial varieties. **Agricultural Water Management**, v. 221, p. 322–333, 20 jul. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377418307212>>. Acesso em: 9 jun. 2019.

SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H. T.; HEMMINGSEN, E. A.; BRADSTREET, E. D. HYDROSTATIC PRESSURE AND OSMOTIC POTENTIAL IN LEAVES OF MANGROVES AND SOME OTHER PLANTS. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 52, n. 1, p. 119–25, jul. 1964. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16591185>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

SEZEN, S. M.; YAZAR, A.; DAŞGAN, Y.; YUCEL, S.; AKYILDIZ, A.; TEKIN, S.; AKHOUNDNEJAD, Y. Evaluation of crop water stress index (CWSI) for red pepper with drip and furrow irrigation under varying irrigation regimes. **Agricultural Water Management**, v. 143, p. 59–70, 1 set. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037837741400184X>>. Acesso em: 24 ago. 2018.

SEZEN, S. M.; YUCEL, S.; TEKIN, S.; YILDIZ, M. Determination of optimum irrigation and effect of deficit irrigation strategies on yield and disease rate of peanut irrigated with drip system in Eastern Mediterranean. **Agricultural Water Management**, v. 221, p. 211–219, 20 jul. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377419302902#fig0015>>. Acesso em: 26 maio. 2019.

SILVA, B. M.; DA SILVA, E. A.; DE OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, M. M.; SERAFIM, M. E. Plant-Available Soil Water Capacity: Estimation Methods and Implications. **Revista Brasileira De Ciencia Do Solo**, v. 38, n. 2, p. 464–475, 2014.

SILVEIRA JUNIOR, E. G.; SIMIONATTO, E.; HABER PEREZ, V.; RODRIGUEZ JUSTO, O.; ZÁRATE, A. H.; DO, M.; VIEIRA, C. Potential of Virginia-type peanut (*Arachis hypogaea* L.) as feedstock for biodiesel production. **Industrial Crops and Products**, v. 89, p. 448–454, 2016a. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0926669016302801/1-s2.0-S0926669016302801-main.pdf?_tid=10adea60-9ef1-11e7-9cc0-00000aab0f27&acdnat=1506014567_c9ea11b49225719451f41618c5773c37>. Acesso em: 21 set. 2017.

SILVEIRA JUNIOR, E. G.; SIMIONATTO, E.; PEREZ, V. H.; JUSTO, O. R.; ZÁRATE, N. A. H.; VIEIRA, M. do C. Potential of Virginia-type peanut (*Arachis hypogaea* L.) as feedstock for biodiesel production. **Industrial Crops and Products**, v. 89, p. 448–454, 30 out. 2016b. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669016302801>>. Acesso em: 24 mar. 2019.

SNEATH, P. H. A.; SOKAL, R. R. Numerical taxonomy. The principles and practice of numerical classification. **Numerical taxonomy. The principles and practice of numerical classification.**, 1973. Disponível em: <<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19730310919>>. Acesso em: 2 jun. 2019.

SOUSA, G. G. de; AZEVEDO, B. M. de; FERNANDES, C. N. V.; VIANA, T. V. de A.; SILVA, M. L. S. Growth, gas exchange and yield of peanut in frequency of irrigation. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 1, p. 27–34, mar. 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-66902014000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 3 jun. 2019.

SOUZA, M. R. M.; PEREIRA, R. G. F.; FONSECA, M. C. M. Comercialização de plantas medicinais no contexto da cadeia produtiva em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 14, n. spe, p. 242–245, 2012.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. **Crop yield response to water**. FOOD AND A ed. [s.l.: s.n.]

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology (sixth edition)**. Universitat Jaume I, 2015.

TOMBESI, S.; CINCERA, I.; FRIONI, T.; UGHINI, V.; GATTI, M.; PALLIOTTI, A.; PONI, S. Relationship among night temperature, carbohydrate translocation and inhibition of grapevine leaf photosynthesis. **Environmental and Experimental Botany**, v. 157, p. 293–298, jan. 2019.

TORRES, I.; SÁNCHEZ, M.-T.; BENLLOCH-GONZÁLEZ, M.; PÉREZ-MARÍN, D. Irrigation decision support based on leaf relative water content determination in olive grove using near infrared spectroscopy. **Biosystems Engineering**, v. 180, p. 50–58, 1 abr. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511018309875#fig5>>. Acesso em: 26 mar. 2019.

VAN GENUCHTEN, M. T. **A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils** *Soil Science Society of America Journal*, 1980. . Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/44/5/SS0440050892>>.

VAN WYK, A. S.; PRINSLOO, G. Medicinal plant harvesting, sustainability and cultivation in South Africa. **Biological Conservation**, v. 227, p. 335–342, nov. 2018.

VIANA, A.; BASTOS, S.; OLIVEIRA, R. C. De; FURTADO, N.; TEIXEIRA, M. B.; ANTONIO, F.; SOARES, L.; CABRAL, E. Productivity and Dry Matter Accumulation of Sugarcane Crop under Irrigation and Nitrogen Application at Rio Verde GO , Brazil. n. September, p. 2374–2384, 2015.

WICKHAM, H. Introduction. In: **ggplot2**. New York, NY: Springer New York, 2009. p. 1–7.

YADA, S.; LAPSLEY, K.; HUANG, G. A review of composition studies of cultivated almonds: Macronutrients and micronutrients. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 24, n. 4–5, p. 469–480, 1 jun. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889157511000378>>. Acesso em: 2 jun. 2019.

YOUSEFZADEH NAJAFABADI, M.; EHSANZADEH, P. Photosynthetic and antioxidative upregulation in drought-stressed sesame (*Sesamum indicum* L.) subjected to foliar-applied salicylic acid. **Photosynthetica**, v. 55, n. 4, p. 611–622, dez. 2017.

YU, T.; FENG, Q.; SI, J.; XI, H.; O’GRADY, A. P.; PINKARD, E. A. Responses of riparian forests to flood irrigation in the hyper-arid zone of NW China. **Science of The Total Environment**, v. 648, p. 1421–1430, 15 jan. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971833256X>>. Acesso em: 26 mar. 2019.

ZHANG, B.; FENG, G.; KONG, X.; LAL, R.; OUYANG, Y.; ADELI, A.; JENKINS, J. N. Simulating yield potential by irrigation and yield gap of rainfed soybean using APEX model in a humid region. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 440–453, 1 nov. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377416303237>>. Acesso em: 12 mar. 2019.

ZHANG, G.; SHEN, D.; MING, B.; XIE, R.; JIN, X.; LIU, C.; HOU, P.; XUE, J.; CHEN, J.; ZHANG, W.; LIU, W.; WANG, K.; LI, S. Using irrigation intervals to optimize water-use efficiency and maize yield in Xinjiang, northwest China. **The Crop Journal**, 7 jan. 2019. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214514119300042>>. Acesso em: 25 mar. 2019. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429005002832>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology (sixth edition)**. Universitat Jaume I, 2015.

TRENTIN, R.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; STEIDLE NETO, A. J. Transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar sob diferentes valores de potencial matricial. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 6, p. 1085–1095, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-691620110006000006&lng=pt&tlng=pt>.

VAN GENUCHTEN, M. T. **A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils** *Soil Science Society of America Journal*, 1980.

VEYSI, S.; NASERI, A. A.; HAMZEH, S.; BARTHOLOMEUS, H. A satellite based crop water stress index for irrigation scheduling in sugarcane fields. **Agricultural Water Management**, v. 189, p. 70–86, 31 jul. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377417301580>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

VIEIRA, G. H. S.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; DELAZARI, F. T. Indicadores morfo-fisiológicos do estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 3 SUPPL. 1, p. 65–75, 2014.

WACLAWOVSKY, A. J.; SATO, P. M.; LEMBKE, C. G.; MOORE, P. H.; SOUZA, G. M. Sugarcane for bioenergy production: An assessment of yield and regulation of sucrose content. **Plant Biotechnology Journal**, v. 8, n. 3, p. 263–276, 2010.

WILKINSON, L. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis by WICKHAM, H. **Biometrics**, v. 67, n. 2, p. 678–679, 2011. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1541-0420.2011.01616.x>>.

ZHANG, D.; DU, Q.; ZHANG, Z.; JIAO, X.; SONG, X.; LI, J. Vapour pressure deficit control in relation to water transport and water productivity in greenhouse tomato production during summer. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 43461, 7 dez. 2017. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/srep43461>>. Acesso em: 22 ago. 2018.

ZINGARETTI, S. M.; RODRIGUES, F. A.; DA GRAÇA, J. P.; PEREIRA, L. D. M.; LOURENÇO, M. V. Sugarcane Responses at Water Deficit Conditions. **Water Stress**, p. 255–276, 2012. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/water-stress/sugarcane-responses-at-water-deficit-conditions-%5CnInTech>>.

Referências

- BARBOSA, E. A. A.; MATSURA, E. E.; DOS SANTOS, L. N. S.; GONÇALVES, I. Z.; NAZÁRIO, A. A.; FEITOSA, D. R. C. Water footprint of sugarcane irrigated with treated sewage and freshwater under subsurface drip irrigation, in Southeast Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 448–456, 1 jun. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617301889>>. Acesso em: 30 abr. 2018.
- BIANCHI, D.; GROSSI, D.; TINCANI, D. T. G.; SIMONE DI LORENZO, G.; BRANCADORO, L.; RUSTIONI, L. Multi-parameter characterization of water stress tolerance in Vitis hybrids for new rootstock selection. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 132, p. 333–340, nov. 2018.
- CLARK, M. Changing Dietary Patterns as Drivers of Changing Environmental Impacts. **Encyclopedia of Food Security and Sustainability**, p. 172–177, 1 jan. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005965219926>>. Acesso em: 24 jun. 2019.
- ĆOSIĆ, M.; STRIČEVIĆ, R.; DJUROVIĆ, N.; LIPOVAC, A.; BOGDAN, I.; PAVLOVIĆ, M. Effects of irrigation regime and application of kaolin on canopy temperatures of sweet pepper and tomato. **Scientia Horticulturae**, v. 238, p. 23–31, 19 ago. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030442381830284X>>. Acesso em: 21 jun. 2019.
- COSTA, J. M.; EGIPTO, R.; SÁNCHEZ-VIROSTA, A.; LOPES, C. M.; CHAVES, M. M. Canopy and soil thermal patterns to support water and heat stress management in vineyards. **Agricultural Water Management**, v. 216, p. 484–496, 1 maio 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377418307133#bib0125>>. Acesso em: 25 mar. 2019.
- DA SILVA BARROS, T. H.; DE ARAUJO PEREIRA, A. P.; DE SOUZA, A. J.; RIBEIRO, N. L.; CARDOSO, E. J. B. N.; COELHO, R. D. Influence of Sugarcane Genotype and Soil Moisture Level on the Arbuscular Mycorrhizal Fungi Community. **Sugar Tech**, p. 1–9, 16 jul. 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12355-018-0640-0>>. Acesso em: 28 ago. 2018.
- DEERY, D. M.; REBETZKE, G. J.; JIMENEZ-BERNI, J. A.; JAMES, R. A.; CONDON, A. G.; BOVILL, W. D.; HUTCHINSON, P.; SCARROW, J.; DAVY, R.; FURBANK, R. T. Methodology for High-Throughput Field Phenotyping of Canopy Temperature Using Airborne Thermography. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1808, 6 dez. 2016. Disponível em: <<http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2016.01808/full>>. Acesso em: 3 maio. 2018.
- EGEA, G.; PADILLA-DÍAZ, C. M.; MARTINEZ-GUANTER, J.; FERNÁNDEZ, J. E.; PÉREZ-RUIZ, M. Assessing a crop water stress index derived from aerial thermal imaging and infrared

thermometry in super-high density olive orchards. **Agricultural Water Management**, v. 187, p. 210–221, 2017.

ELSAIED, S.; ELHOWEITY, M.; IBRAHIM, H. H.; DEWIR, Y. H.; MIGDADI, H. M.; SCHMIDHALTER, U. Thermal imaging and passive reflectance sensing to estimate the water status and grain yield of wheat under different irrigation regimes. **Agricultural Water Management**, v. 189, p. 98–110, 2017.

ERCIN, E. Overuse of Water Resources: Water Stress and the Implications for Food and Agriculture. **Encyclopedia of Food Security and Sustainability**, p. 206–211, 1 jan. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005965219987>>. Acesso em: 24 jun. 2019.

FISCHER, H. W.; REDDY, N. L. N.; RAO, M. L. S. Can more drought resistant crops promote more climate secure agriculture? Prospects and challenges of millet cultivation in Ananthapur, Andhra Pradesh. **World Development Perspectives**, v. 2, p. 5–10, 1 jun. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S245229291630090X>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

GARCIA-TEJERO, I. F.; HERNÁNDEZ, A.; PADILLA-DÍAZ, C. M.; DIAZ-ESPEJO, A.; FERNÁNDEZ, J. E. Assessing plant water status in a hedgerow olive orchard from thermography at plant level. **Agricultural Water Management**, v. 188, p. 50–60, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.004>>.

GARCÍA-TEJERO, I. F.; HERNÁNDEZ, A.; PADILLA-DÍAZ, C. M.; DIAZ-ESPEJO, A.; FERNÁNDEZ, J. E. Assessing plant water status in a hedgerow olive orchard from thermography at plant level. **Agricultural Water Management**, v. 188, p. 50–60, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.004>>.

GONZALEZ-DUGO, V.; ZARCO-TEJADA, P. J.; FERERES, E. Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 198–199, p. 94–104, 1 nov. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192314001841>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L. NORMALIZING THE STRESS-DEGREE-DAY PARAMETER FOR ENVIRONMENTAL VARIABILITY*. **Agricultural Meteorology**, v. 24, p. 45–55, 1981. Disponível em: <https://ac.els-cdn.com/0002157181900327/1-s2.0-0002157181900327-main.pdf?_tid=89c7d56c-e08c-43f2-af23-ed4043a3eda0&acdnat=1525285127_6faee5f8948af5c8fbe47c8b6d90765f>. Acesso em: 2 maio. 2018.

IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L.; WALKER, G. K.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J. A

generalization of the stress-degree-day concept of yield prediction to accommodate a diversity of crops. **Agricultural Meteorology**, v. 21, n. 3, p. 205–211, 1980.

IHUOMA, S. O.; MADRAMOOTOO, C. A. Recent advances in crop water stress detection. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 141, p. 267–275, 1 set. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169916310766>>. Acesso em: 22 jun. 2019.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2, p. 185–202, 2005.

JACKSON, R. D.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; PINTER, P. J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water Resources Research**, v. 17, n. 4, p. 1133–1138, 1981.

JONES, H. G. Application of Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Physiology and Ecophysiology. In: [s.l.: s.n.]p. 107–163.

JONES, H. G.; SERRAJ, R.; LOVEYS, B. R.; XIONG, L.; WHEATON, A.; PRICE, A. H. Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. **Functional Plant Biology**, v. 36, n. 11, p. 978–989, 2009.

KHORSANDI, A.; HEMMAT, A.; MIREEI, S. A.; AMIRFATTAHI, R.; EHSANZADEH, P. Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions. **Agricultural Water Management**, v. 204, p. 222–233, maio 2018a.

KHORSANDI, A.; HEMMAT, A.; MIREEI, S. A.; AMIRFATTAHI, R.; EHSANZADEH, P. Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions. **Agricultural Water Management**, v. 204, p. 222–233, maio 2018b. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377418303573>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

LIU, J.; BASNAYAKE, J.; JACKSON, P. A.; CHEN, X.; ZHAO, J.; ZHAO, P.; YANG, L.; BAI, Y.; XIA, H.; ZAN, F.; QIN, W.; YANG, K.; YAO, L.; ZHAO, L.; ZHU, J.; LAKSHMANAN, P.; ZHAO, X.; FAN, Y. Growth and yield of sugarcane genotypes are strongly correlated across irrigated and rainfed environments. **Field Crops Research**, v. 196, p. 418–425, 2016.

MARIANO, E.; JONES, D. L.; HILL, P. W.; TRIVELIN, P. C. O. Mineralisation and sorption of dissolved organic nitrogen compounds in litter and soil from sugarcane fields. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 103, p. 522–532, dez. 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038071716303339>>. Acesso em: 17 jul. 2017.

NELSON, W. C. D.; HOFFMANN, M. P.; VADEZ, V.; ROETTER, R. P.; WHITBREAD, A. M. Testing pearl millet and cowpea intercropping systems under high temperatures. **Field Crops Research**, v. 217, p. 150–166, mar. 2018.

PADAKANDLA, S. R. Climate sensitivity of crop yields in the former state of Andhra Pradesh, India. **Ecological Indicators**, v. 70, p. 431–438, 1 nov. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X16303077>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

SANTESTEBAN, L. G.; DI GENNARO, S. F.; HERRERO-LANGREO, A.; MIRANDA, C.; ROYO, J. B.; MATESE, A. High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard. **Agricultural Water Management**, v. 183, p. 49–59, mar. 2017.

SINGH, M. Effects of plant spacing, fertilizer, modified urea material and irrigation regime on herbage, oil yield and oil quality of rosemary in semi-arid tropical conditions. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v. 79, n. 3, p. 411–415, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology (sixth edition)**. Universitat Jaume I, 2015.

TARJUELO, J. M.; RODRIGUEZ-DIAZ, J. A.; ABADÍA, R.; CAMACHO, E.; ROCAMORA, C.; MORENO, M. A. Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies. **Agricultural Water Management**, v. 162, p. 67–77, 1 dez. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377415300755>>. Acesso em: 12 mar. 2019.