

UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

DISSERTAÇÃO

**Desenvolvimento e Avaliação de um Protótipo a Baixo Custo para
Detecção de Estresse Hídrico na Berinjela**

Jane Andreon Ventorim

2018



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
E AMBIENTAL**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM PROTÓTIPO A BAIXO
CUSTO PARA DETECÇÃO DE ESTRESSE HÍDRICO NA BERINJELA**

JANE ANDREON VENTORIM

Sob a Orientação do Professor
Elias Fernandes de Sousa

e Coorientação do Professor
Leonardo Duarte Batista da Silva

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, Área de Concentração em Sistemas Agrícolas

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2018

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V469d Ventorim, Jane Andreon, 1991-
Desenvolvimento e Avaliação de um Protótipo a
Baixo Custo para Detecção de Estresse Hídrico na
Berinjela / Jane Andreon Ventorim. - 2018.
57 f.: il.

Orientador: Elias Fernandes de Sousa.
Coorientador: Leonardo Duarte Batista da Silva.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Pós Graduação em Engenharia
Agrícola e Ambiental , 2018.

1. CWSI. 2. DPV. 3. Índice de estresse hídrico. 4.
Temperatura foliar. I. Sousa, Elias Fernandes de ,
1965-, orient. II. Silva, Leonardo Duarte Batista da,
1971-, coorient. III Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro. Pós Graduação em Engenharia Agrícola e
Ambiental . IV. Título.

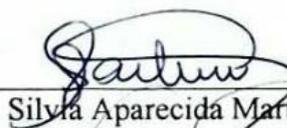
**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL**

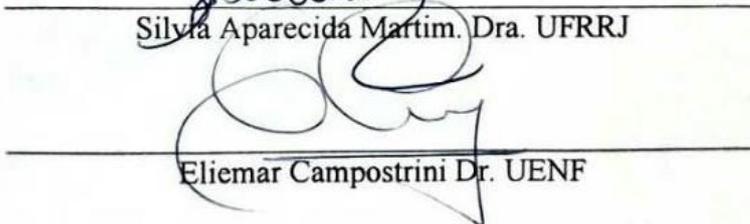
JANE ANDREON VENTORIM

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, Área de Concentração em Sistemas Agrícolas.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 27/02/2018


Leonardo Duarte Batista da Silva. Dr. UFRRJ (Coorientador)


Sílvia Aparecida Martim. Dra. UFRRJ


Eliemar Campostrini Dr. UENF

AGRADECIMENTOS

À Deus, por estar sempre presente em minha vida, me fortalecendo e por iluminar meus caminhos e escolhas.

Ao meu orientador Elias Fernandes de Sousa, por todos conselhos e pelo empenho para realização deste trabalho, apesar da distância.

Ao meu coorientador Leonardo Duarte pela confiança, amizade e apoio desde o início da graduação.

À professora Silva Martim por todos os conselhos e ensinamentos desde o início da realização deste trabalho.

Ao professor Daniel Carvalho e o Doutorando Eleandro agradeço por ajudar com as análises de solo e pela disponibilidade para ajudar sempre que preciso.

A todos os mestres que contribuíram de alguma forma na minha formação.

Às alunas Débora e Luísa do curso de Agronomia e Engenharia Agrícola e Ambiental por todo apoio durante a realização do experimento.

A todos os pesquisadores da PESAGRO-RIO pelo conhecimento passado e suporte nas atividades experimentais.

A todos os profissionais da PESAGRO-RIO que, direta ou indiretamente ajudaram no desenvolvimento das atividades experimentais, em especial ao Lima e Noronha pelo apoio diário.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), que por meio do professor Elias foi de fundamental importância na parceria com Laboratório de Engenharia Agrícola para realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

A minha família amada, meus pais Jorge e Izabel, obrigada por confiar em mim, por me darem força, amor e principalmente e princípios valores sem os quais eu não teria chegado até aqui.

Aos meus irmãos Isaac e Janice pela amizade, confiança e por se fazerem sempre presentes apesar de toda distância.

Ao meu noivo Odair, pelo companheirismo e amor, por seus conselhos e bom humor que tornaram a caminhada mais feliz.

Aos meus amigos queridos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, em especial a Suelen, por ser exemplo com toda sua garra e determinação, Iasca, por ser amiga e mãe e à Marcela, por ser companheira, parceira, amiga, ombro em todos os momentos.

À Família F1 -17, meu lar, minha família na Rural durante os anos da graduação. Aprendemos, crescemos e nos fortalecemos juntas. Obrigada pelas broncas, por todo cuidado e pela amizade que se mantém além da Rural.

Aos amigos da Casa da Colina: Layzza, Sho, Karen, Bruno e Leo, que acompanharam de perto todo este trabalho. Obrigada pela paciência, por entenderem a minha falta de paciência, pelos encontros, pela amizade e parceria que tornaram os últimos anos mais agradáveis.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, escola da vida, por proporcionar sete anos incríveis. Obrigada pela oportunidade e estar aqui e pelas lições diárias que me forçam a melhorar a cada dia.

Por fim, agradeço a todos que acreditaram no meu potencial e contribuíram direta ou indiretamente para este trabalho.

DEDICATÓRIA

“Para todos que tiveram um momento de fraqueza. Não vai doer para sempre, então não deixe isso afetar o que há de melhor em você.” J. A. Redmerski

RESUMO

VENTORIM, Jane Andreon. **Desenvolvimento e Avaliação de um Protótipo a Baixo Custo para Detecção de Estresse Hídrico na Berinjela**. 2018. 44p Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Departamento Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2018.

Os indicadores do status hídrico das plantas podem ser utilizados em diversas situações. Todavia, grande parte destes indicadores é determinada com a utilização de equipamentos caros, por meio de técnicas, muitas vezes, demoradas. Dessa forma, a utilização da termometria por infravermelho apresenta-se como uma ótima alternativa, sendo de baixo custo e alta praticidade na determinação do estresse hídrico em plantas. O objetivo deste trabalho foi avaliar se o índice de estresse hídrico da cultura (CWSI) estimado, calculado através do déficit de pressão de vapor (DPV), da temperatura da folha (T_c), da temperatura do ar (T_a) e umidade relativa (UR), pode ser utilizado como indicador de estresse hídrico para a cultura da berinjela e, avaliar se há necessidade de se obter o CWSI medido a partir da temperatura úmida da folha (T_w), comparando com o CWSI estimado e verificar se há relação entre o CWSI estimado, o potencial hídrico, a umidade do solo e os parâmetros de crescimento. O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Centro Estadual de Pesquisa em Agricultura Orgânica (PESAGRO) localizado no município de Seropédica – RJ. A cultura implantada foi a berinjela (*Solanum melongena* L.), cultivar Nápoli, cultivada em vasos de 18 L, preenchidos com uma mistura de solo franco argilo arenoso e 20% de substrato comercial, com espaçamento de 0,70 m x 1,0 m, dispostos em 6 linhas e com 7 vasos cada. O sistema de irrigação utilizado foi localizado, por gotejamento. As plantas foram distribuídas aleatoriamente em dois tratamentos. T1 e T2. Onde T1 representa as plantas que foram mantidas próximas a capacidade de campo e T2 representando as plantas que sofreram estresse hídrico. As plantas foram submetidas a sete ciclos de estresse, com duração entre dois e três dias, variando conforme as condições climáticas. Todas as plantas eram mantidas próximas a capacidade de campo, dando início ao ciclo. Logo a irrigação era suspensa em T2, e T1 era mantido sempre próximo a capacidade de campo. Após T2 sofrer o déficit hídrico, a irrigação era retomada em todas as plantas por, pelo menos, dois dias antes de iniciar um novo ciclo. Com intuito de estabelecer uma correlação CWSI estimado foram avaliadas as variáveis umidade do solo e potencial hídrico foliar. Verificou-se que há um ajustamento satisfatório entre o intervalo ($T_c - T_a$) com o DPV, o que significa que não há necessidade de medir T_w , quando há possibilidade de calcular DPV. A relação entre o $CWSI_{est}$ com o $CWSI_{med}$ obteve desempenho do modelo de estimação classificado como “Muito bom”. Dessa forma, o $CWSI_{est}$, utilizando os dados provenientes do protótipo a baixo custo, pode ser utilizado como indicador de estresse hídrico para a cultura da berinjela. O $CWSI_{est}$ apresentou valores relativamente mais altos à medida a umidade do solo diminuiu. Para o potencial hídrico, o $CWSI_{est}$ aumentou à medida que o mesmo diminuiu, concluindo que é possível a utilização do protótipo para detectar o déficit hídrico na berinjela.

Palavras-chave: CWSI, déficit hídrico, déficit de pressão de vapor, índice de estresse hídrico, temperatura foliar.

ABSTRACT

VENTORIM, Jane Andreon. **Development and Evaluation of a Low Cost Prototype for Detection of Water Stress in Eggplant.** 2018. 44p Dissertation (Master in Agricultural and Environmental Engineering). Instituto de Tecnologia, Departamento Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2018.

The indicators of the water status of the plants can be used in several situations. However, most of these indicators are determined by the use of expensive equipment, often through time-consuming techniques. Thus, the use of infrared thermometry presents itself as a great alternative, being of low cost and high practicality in the determination of water stress in plants. The objective of this work was to evaluate if the estimated water stress index of the crop (CWSI), calculated through the vapor pressure deficit (VDP), leaf temperature (T_c), air temperature (T_a) and relative humidity (UR), can be used as an indicator of water stress for the eggplant crop, and evaluate if there is a need to calculate the CWSI measured from the wet leaf temperature (T_w), comparing with the estimated CWSI and verify if there is a relation between the CWSI estimated, water potential, soil moisture and growth parameters. The experiment was conducted in a greenhouse at the Centro Estadual de Pesquisa em Agricultura Orgânica (PESAGRO) localizado no município de Seropédica – RJ. The culture was planted with eggplant (*Solanum melongena* L.), hybrid Nápoli, cultivated in 18 L pots, filled with a mixture of sandy clay loam soil and 20% of commercial substrate, spaced 0.70 x 1.0 m, arranged in 6 rows and with 7 pots each. The irrigation system used was located by drip irrigation. The plants were randomly assigned to two treatments. T1 and T2. Where T1 represents the plants that were maintained near the field capacity and T2 representing the plants that underwent water stress. The plants were submitted to seven cycles of stress, lasting between two and three days, varying according to the climatic conditions. All plants were kept close to field capacity, starting the cycle. Soon irrigation was suspended in T2, and T1 was always kept close to field capacity. After T2 suffered the water deficit, irrigation was resumed in all plants for at least two days before starting a new cycle. In order to establish an estimated CWSI correlation, the variables soil moisture and leaf water potential were evaluated. It was possible to verify that there is a satisfactory fit between the interval ($T_c - T_a$) and the VDP, which means that there is no need to measure T_w when it is possible to calculate VDP. The relationship between CWSI_{est} and CWSI_{med} obtained performance from the pet model rated "Very Good". Therefore, the CWSI_{est}, using data from the prototype at low cost, can be used as an indicator of water stress for the eggplant crop. As the soil moisture decreased, the CWSI_{est} presented relatively higher values. For the water potential, the CWSI_{est} increased as it decreased, concluding that it is possible to use the prototype to detect the water deficit in the eggplant.

Keywords: CWSI, leaf temperature, vapor pressure deficit, water deficit, water stress index.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise física do solo utilizado no experimento.	13
Tabela 2. Análise Química do solo.	14
Tabela 3. Período correspondente a cada ciclo analisado. O início do ciclo corresponde a data em que T1 e T2 se apresentavam sem déficit hídrico. Já no fim do ciclo T1 permanecia sem déficit hídrico e T2 estava sob estresse.	17
Tabela 4. Critério de avaliação do desempenho dos modelos de estimativa pelo índice de confiança “c” proposto por Camargo & Sentelhas (1997).	26
Tabela 5. Parâmetros obtidos na análise de retenção do solo pelo programa HYPROP-FIT com melhor ajuste em Van Genuchten-Mualem (1980) (VGmn-3100).	29

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Mudanças fisiológicas devido a desidratação: potencial hídrico sob diferentes condições de crescimento e processos fisiológicos. A intensidade da coloração da barra corresponde a magnitude do processo. 9
- Figura 2.** Imagem parcial do conjunto de casas de vegetação, localizado nas instalações da PESAGRO- RIO, Seropédica, RJ e visão interna da estufa após a instalação do experimento. 12
- Figura 3.** Esquema estrutural e dimensional estufa baixo custo com área de 280m² (8m x 35m), construída de acordo com o Informe Técnico 29 da Pesagro-Rio..... 13
- Figura 4.** Disposição dos vasos dentro da estufa. Os vasos em azul (T1), representam as plantas sem déficit hídrico. Já os vasos em vermelho (T2), representam as plantas que foram submetidas ao estresse hídrico..... 14
- Figura 5.** Croqui do sistema de irrigação por gotejamento utilizado. Os gotejadores em azul (T1) se localizam no centro do vaso, à esquerda. E os gotejadores em vermelho (T2) estão no centro no vaso, à direita. As linhas laterais de cada tratamento se conectam as suas respectivas linhas principais, controladas através de um registro. 15
- Figura 6.** Detalhe da disposição dos gotejadores no vaso: o gotejador está instalado apenas na linha lateral correspondente ao tratamento, neste caso, T2, à direita. 15
- Figura 7.** Porte da planta no início da aplicação dos tratamentos em 90 DAT, apresentando altura média de 0,5m. 16
- Figura 8.** Medição da temperatura úmida da folha (Tw) simulando uma situação em que a folha se apresenta sem déficit hídrico (a). Medição temperatura da folha (Tc) (b)..... 18
- Figura 9.** Câmara de pressão de Scholander prestes a ser utilizada para medir o potencial de água na folha da berinjela (a); Câmara com a folha posicionada, aguardando o início da medição do potencial hídrico (b); Análise do potencial hídrico, aguardando a exsudação da água retida na folha, com auxílio de uma lupa (c). 22
- Figura 10.** Esquema representativo da medição de umidade feita, por tecnologia ISAF, (impedância do solo em alta frequência)..... 23
- Figura 11.** Posição do sensor de umidade do solo instalado no vaso (a). Momento da medição da umidade do solo (b). 24
- Figura 12.** Representação esquemática do aparelho HYPROP, utilizado para a análise de retenção de água no solo..... 25
- Figura 13.** Variação diária da temperatura máxima, mínima e média durante o período do experimento. 28
- Figura 14.** Variação diária da radiação solar global e da umidade relativa média durante o período do experimento. 28

Figura 15. Curva de retenção do solo obtida através do programa HYPROP-FIT, tendo melhor ajuste em Van Genuchten-Mualem (1980) (VGmn-3100) e parâmetros utilizados. Obtendo para $0,49 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para a CC e $0,34 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para PM.....	29
Figura 16. Calibração da sonda HidroFarm para umidade do solo por meio do método gravimétrico.....	30
Figura 17. Análise do déficit de pressão de vapor (kPa) com relação a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), mostrando que há uma relação linear entre as variáveis.	31
Figura 18. Análise entre as linhas base inferior $(Tc-Tar)_{med}$, $(Tc-Tar)_{con}$, e $(Tc-Tar)_{est}$, correlacionadas com o DPV.	32
Figura 19. Avaliação entre o índice de estresse da cultura obtido através da temperatura úmida medida, $CWSI_{med}$ e estimado com base no DPV, $CWSI_{est}$	33
Figura 20. Índice de estresse hídrico da cultura estimado ($CWSI_{est}$) em função da umidade do solo (cm^3/cm^3).....	35
Figura 21. Relação entre o potencial hídrico foliar (-Mpa) e o coeficiente de estresse hídrico foliar estimado ($CWSI_{est}$) para a cultura da berinjela.	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISAO DE LITERATURA	3
2.1 Relações Hídricas	3
2.2 Estresse Hídrico nas Plantas	4
2.4 Termometria por Infravermelho	6
2.5 <i>Crop Water Stress Index</i> (CWSI)	6
2.6 Potencial Hídrico Foliar.....	8
2.7 A Cultura da Berinjela	10
3 MATERIAL E METODOS	12
3.1 Caracterização do experimento.....	12
3.2 Sistema de Irrigação.....	15
3.3 Tratos culturais e adubação complementar.....	16
3.4 Aplicação dos Tratamentos.....	16
3.5 Temperatura da folha	17
3.6 <i>Crop Water Stress Index</i> (CWSI)	19
3.6.1 Índice de estresse hídrico da cultura medido (CWSI _{med})	19
3.6.2 Índice de estresse hídrico da cultura estimado (CWSI _{est})	20
3.7 Potencial de água na folha	21
3.8 Umidade do Solo	23
3.8.1 Calibração sonda de Umidade do Solo	24
3.8.2 Curva de Retenção de Água no Solo	24
3.9 Delineamento Experimental e Análise Estatística	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 Dados Meteorológicos	27
4.2 Curva de Retenção de Água no Solo	28
4.2 Calibração Sonda de Umidade do Solo	30
4.4 Determinação da Linha Base Inferior (LBI).....	30
4.5 Índice de estresse hídrico da cultura medido (CWSI _{med}) e estimado (CWSI _{est}).....	33
4.6 Índice de Estresse Hídrico da Cultura Estimado (CWSI _{est}) e a Umidade do Solo	34

4.7 Índice de Estresse Hídrico da Cultura Estimado (CWSI _{est}) e o Potencial Hídrico Foliar	36
5 CONCLUSÕES	38
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1 INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada representa 20% do total das terras agrícolas cultivadas totais do mundo, sendo capaz de fornecer 40% da alimentação mundial. (HOFFMAN e EVANS, 2007). Apresenta-se como o setor que mais consome água, em torno de 70%, em diversos países, inclusive no Brasil. Esse consumo tende a aumentar até 2050 para atender a demanda crescente de alimentos (FAO, 2015).

À medida que a população humana aumenta, a demanda pelos recursos naturais é cada vez maior, acompanhando o crescimento demográfico. Com intensos períodos de seca, podendo levar a períodos de escassez de água disponível para os cultivos agrícolas, a produtividade no campo pode ser fortemente afetada, colocando em risco a segurança alimentar em todo o mundo (LEI et al., 2016). Hoje, o desafio é atender às crescentes demandas de produtividade, melhorando os métodos de manejo das culturas (BEHMANN et al., 2014).

De maneira geral, o crescimento das hortaliças é influenciado pela umidade do solo. O estresse hídrico, normalmente, apresenta-se como fator limitante para se obter produtividades satisfatórias e produtos de boa qualidade (VIEIRA, 1994).

Para avaliar a resposta das hortaliças ao estresse hídrico podem ser usadas diversas metodologias. Destaca-se o potencial de água na folha, que indica com precisão o estado hídrico da planta, apesar de funcionar com um ótimo indicador do status hídrico é um método destrutivo, requer um número consideravelmente grande de folhas para análise, além de exigir cuidados no momento da coleta, do transporte e da análise, em que se faz necessário um operador qualificado para executar as análises com eficácia. Dessa forma, devido à falta de praticidade, o uso do potencial hídrico foliar por meio da câmara de Scholander acaba sendo viável apenas para o meio científico.

Boa parte dos indicadores de estresse hídrico é determinada com a utilização de equipamentos caros, por meio de técnicas, muitas vezes, demoradas. A utilização da termometria por infravermelho para medir a temperatura da folha é uma opção promissora para determinação do índice de estresse hídrico da cultura (CWSI). Em diversos estudos, o CWSI tem se mostrado um bom indicador do estado hídrico das plantas.

Diante do exposto, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar se o CWSI obtido por meio da temperatura foliar, utilizando um protótipo a baixo custo, pode ser utilizado como indicador de estresse hídrico para a cultura da berinjela. Além disso, como objetivos específicos: verificar se há necessidade de medir a temperatura úmida da folha para se obter

o CWSI medido, comparando, dessa forma com o CWSI estimado, obtido por meio do déficit de pressão de vapor (DPV), verificar se há relação entre o CWSI estimado e o potencial hídrico e a umidade do solo.

2 REVISAO DE LITERATURA

2.1 Relações Hídricas

A medida que a pressão sobre os recursos hídricos aumenta, a irrigação é levada a concorrer com outros setores pela utilização da água, como a indústria, agravando as alterações antrópicas no meio ambiente em determinadas regiões no mundo todo. Apesar desses problemas e das consequências da utilização irracional, sendo alarmado por diversos setores da sociedade (HOFFMAN e EVANS, 2007), é fato que a irrigação continuará a ser um componente necessário e fundamental em todo o mundo. Todas estas questões exigem a implementação de uma irrigação sustentável, manejada de forma correta e consciente, com intuito de minimizar os impactos no meio ambiente, mantendo alto nível de produtividade dos alimentos.

Apesar do mercado lançar a cada momento novas tecnologias visando proporcionar um manejo adequado, a eficiência da irrigação é significativamente reduzida se o manejo da água aplicada for inadequado. É observado que a razão disso, muitas das vezes, é devido ao fato de o produtor irrigar em excesso, acreditando que a planta possa estar submetida a algum estresse hídrico. (QUEIROZ, 2007).

Contudo, a irrigação em excesso implica em perda de água e de nutrientes, por lixiviação. Por outro lado, aplicando uma quantidade de água inferior a exigida pela cultura, a lâmina atingirá apenas as camadas superficiais do solo, diminuindo a reserva de água próximas a zona radicular o que se torna prejudicial ao crescimento de suas raízes. (ANDRADE, 2013).

O solo apresenta-se como um conjunto de agregados rochosos e compostos orgânicos e inorgânicos, formando assim uma estrutura essencial, com capacidade de abranger em sua composição um emaranhado de partículas, com características bióticas e abióticas, unidas por uma rede complexa de parâmetros e atributos físicos e químicos com importante papel de poder fornecer às plantas, principalmente o suporte físico, água e nutrientes (HAMBLIN, 1985).

As condições físico-químicas do solo são fatores de grande importância para o crescimento das plantas. Quando não há disponibilidade hídrica e de nutrientes às raízes, é possível verificar diferenças morfofisiológicas no dossel da cultura, principalmente devido ao sistema radicular dispor de mecanismos capazes de detectar as condições adversas do meio e enviar sinais à parte aérea da cultura, como uma forma de alerta para controlar o crescimento e a expansão foliar (DAVIES e ZHANG, 1991).

Dessa forma, quando o volume de água no solo não atende às necessidades hídricas das plantas, principalmente na fase de crescimento das culturas, se desenvolve um estresse hídrico, contribuindo para uma rápida resposta morfofisiológica da planta que acarreta no impedimento das trocas gasosas pelos estômatos e no cessamento da fotossíntese (TAIZ e ZEIGER, 2004), assim como a planta apresenta-se com redução do teor de água, diminuição do potencial de água foliar e perda de turgor, fechamento de estômatos e diminuição crescimento celular (JALEEL, 2009). Esses fatores acabam gerando diversas consequências que são inicialmente reversíveis em princípio, mas que podem se tornar permanentes. (LARCHER, 2000).

2.2 Estresse Hídrico nas Plantas

As plantas podem estar submetidas a diversos tipos de estresse. Entretanto, de acordo com Heinemann (2010), o estresse por deficiência hídrica é um dos fatores que mais afeta negativamente a produção e estabilidade produtiva das culturas. O estresse hídrico é considerado muito complexo, devido as diversas interações entre fatores de estresse e vários fatores moleculares, bioquímicos e fenômenos fisiológicos que afetam o crescimento da planta e conseqüentemente seu desenvolvimento (RAZMJOO et al., 2008).

Para caracterizar o grau de déficit hídrico, com a intenção de otimizar o manejo de irrigação em culturas anuais, são utilizados indicadores do solo, como o potencial matricial e a umidade do solo, com base no armazenamento de água e na evapotranspiração. (ANGELOCCI, 2002). Porém, partindo de plantas isoladas, é muito difícil utilizar esses indicadores sem cometer grandes erros. De acordo com Clarke (1997), ao utilizar uma amostragem de solo para avaliar a sua umidade se assume que a retenção de água em todo aquele solo é uniforme, o que muitas vezes não condiz com a realidade.

Kramer e Boyer (1995), afirmam que as plantas são as melhores indicadoras do status hídrico, uma vez que integram automaticamente os fatores que afetam o seu estado de hidratação. Wang et al. (2015) indicaram que as culturas estressadas, manifestaram sintomas como, crescimento reduzido e redução da área foliar. Além disso, o déficit hídrico pode levar à redução da biomassa, rendimento e qualidade das culturas. (ALADENOLA e MADRAMOOTOO, 2014; ZHANG et al., 2017)

Rufino et al. (2012) ao avaliar o desempenho de quatro genótipos de milho que foram submetidos a diferentes períodos de déficit hídrico no estágio de crescimento vegetativo, constataram que todas as características da parte aérea das plantas foram prejudicadas pela

redução da disponibilidade hídrica, como nos parâmetros de fitomassa, área foliar e altura de planta.

Com objetivo de avaliar os efeitos do déficit hídrico sobre o desenvolvimento do feijão-fava em ambiente protegido, Oliveira et al. (2014) relatam que o déficit afetou o desenvolvimento da cultura, diminuindo o índice de área foliar, e bem como aumentando o abortamento de flores e vagens.

Dentre os indicadores utilizados para se obter o status hídrico da planta, se destacam o potencial de água na folha, que pode ser medido utilizando uma câmara de pressão (KATERJI et al., 1988); a temperatura da folha, que pode ser medida por meio da termografia infravermelha (JACKSON, 1981, JONES et al., 1997).

2.3 Temperatura Foliar

Outro indicador de estresse hídrico é a temperatura foliar, pelo fato de que a água transpirada resfria a folha. Portanto, conforme o teor de água do solo diminui, a transpiração diminui e a temperatura das folhas aumenta, ficando mais alta que a temperatura do ar, devido à maior absorção da radiação (FOLEGATTI e OLITTA, 1988).

De acordo com Taiz e Zeiger (2004), quando a taxa de transpiração é maior que a absorção de água, a planta pode fechar seus estômatos. Desta maneira, a radiação que é interceptada pela folha tende a promover um aquecimento foliar, podendo chegar a níveis prejudiciais ao crescimento da planta. Considerando as mesmas condições ambientais, uma planta que se encontra sob condições de déficit hídrico apresenta temperatura foliar superior quando comparada à uma planta que foi cultivada sem restrição hídrica. (TESTI et al., 2008).

Vieira et al. (2014) estudando indicadores morfofisiológicos do estresse hídrico na cana-de-açúcar, sob diferentes lâminas de irrigação, observaram que a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura das folhas foi aumentando à medida que houve redução do suprimento hídrico à cultura, alcançando uma diferença de 6,3°C.

Dessa forma, entende-se que o estresse hídrico está diretamente relacionado com o aumento da temperatura da folha, conforme apresentado por Maggiotto (1996), em que a temperatura foliar em plantas com déficit hídrico apresentaram temperatura de 4 a 5°C a mais que a temperatura do ar, quando o fechamento estomático ocorre.

2.4 Termometria por Infravermelho

A técnica de termometria por infravermelho utiliza radiômetros que medem a energia na faixa do infravermelho, para estimar a temperatura nesta faixa de radiação (CAMPBELL e NORMAN, 1998).

A termometria por infravermelho permite a determinação da temperatura à distância e apresenta-se como uma técnica eficaz e segura para a determinação da temperatura foliar. (ANGELOCCI, 2002).

Stockle e Dugas (1992), relataram que o uso de medidas de temperatura da cobertura vegetal, tornou-se prático a partir do desenvolvimento dos termômetros infravermelhos capazes de medirem a radiação térmica emitida. O desenvolvimento de termômetros a infravermelho portáteis e de baixo custo, no início dos anos 70, permitiu o aumento das pesquisas sobre o uso de sensores remotos para a medição da temperatura das plantas e sobre a possibilidade de detecção da ocorrência de estresse hídrico (GARCIA et al., 2000).

Além de ser um método não destrutivo, pois não há necessidade de contato físico do sensor com as folhas do dossel das plantas, apresenta-se como um método fácil de usar e com rapidez nas respostas das medições (KIRKHAN, 2014).

As principais vantagens da termometria infravermelha, sobre técnicas convencionais de detecção do estresse hídrico, como sintomas visuais, condutância estomática, fluxo de seiva, balanço de água no solo, são a facilidade e a rapidez com que as medidas de temperatura da folha podem ser obtidas. Porém, um dos problemas para se obter os índices de estresse hídrico está na manipulação do aparelho, ou seja, posicionar o ângulo corretamente na hora das medições, de acordo com McGuire et al. (1989), além da estrutura da vegetação e a porcentagem de solo coberto podem afetar as medidas do sensor térmico.

2.5 Crop Water Stress Index (CWSI)

Ao combinar a equação do balanço de energia e a equação de Penman Monteith, Jackson et al. (1981) apresentaram as considerações teóricas para o desenvolvimento do CWSI baseado na diferença entre a temperatura foliar e a temperatura do ar. E, comparando, esta diferença de temperatura em condições de déficit hídrico severo e de ausência de limitação de água, estes autores elaboraram os limites máximos e mínimos de variação desta diferença denominados, respectivamente, linha base superior (LBS) e linha base inferior (LBI).

Desta forma, o limite superior experimental representa o estresse hídrico máximo tolerado pela cultura, sendo definido quando os estômatos estariam completamente fechados. Enquanto a linha inferior representa uma planta sem restrição hídrica. Sendo assim, segundo os limites experimentais, o índice de estresse hídrico para a cultura estará compreendido entre zero, quando o estresse é nulo e igual a um quando há estresse máximo (JACKSON et al. 1981).

Diante da dificuldade de se determinar com exatidão os valores críticos da temperatura foliar e a temperatura do ar em condições de campo, métodos alternativos de estimativa têm sido propostos para obtenção desses valores de referência (WIDMOSER, 2010). Logo, as linhas bases superior e inferior podem ser obtidas de diversas formas.

Idso (1982), apresentou uma abordagem empírica que utiliza a temperatura do dossel, a temperatura do ar e o déficit de pressão de saturação de vapor no ar para estimar o limite inferior. Em seu estudo foi demonstrado que o limite inferior do CWSI é uma função linear de DPV para diversos cultivos e localidades. Conduzindo experimentos com 26 culturas utilizando termometria infravermelha, Idso et al. (1982) também verificaram uma relação linear entre $T_c - T_a$ e o DPV. Neste estudo, quando as plantas foram cultivadas sem nenhuma restrição hídrica, os dados obtidos da diferença de temperatura $T_c - T_a$ permitiram estabelecer uma linha base inferior para cada cultura em estudo.

Dayube et al. (2016), avaliaram a variação do índice de estresse hídrico na cultura do algodão irrigado em função do déficit de umidade no solo. Os valores do CWSI, calculados com base na temperatura foliar, umidade relativa do ar, temperatura do ar e déficit de pressão de vapor, variaram de forma proporcional ao déficit de umidade no solo.

Sepaskhah e Kashefipour (1994), utilizando termômetro infravermelho e diferentes lâminas de irrigação, em citros, irrigado por gotejamento, encontraram uma relação linear entre o CWSI com base no DPV para limão doce (*Citrus limetta*, Swing).

Erdem et al. (2010) ao realizarem um estudo sobre o CWSI em brócolis (*Brassica oleracea L.*) sob diferentes níveis de irrigação, concluíram que o valor de CWSI obteve boa correlação com o teor de umidade do solo e o potencial hídrico da planta e que, portanto, pode ser utilizado para avaliar o estresse hídrico da cultura.

2.6 Potencial Hídrico Foliar

O status hídrico da planta pode ser determinado utilizando fatores fisiológicos ou fatores físicos. Os indicadores fisiológicos são medidas diretas ou indiretas do estado hídrico da planta, enquanto os indicadores físicos referem-se a fatores ambientais que influenciam o equilíbrio hídrico da planta. Vários estudos apresentam os indicadores fisiológicos como mais confiáveis para determinar o status hídrico da planta, em comparação com os fatores ambientais, de todo modo, não existe um acordo sobre qual é o mais adequado (KATERJI et al., 1988).

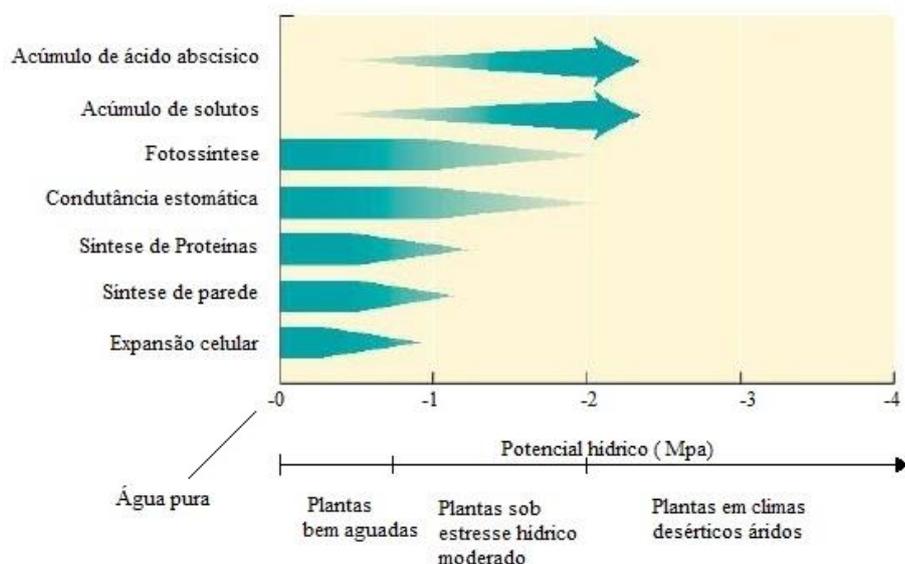
Dentre as variáveis fisiológicas, o ideal, de acordo com Nogueira et al. (2001) é que a avaliação do estado hídrico da planta seja realizada por mais de uma variável, dentre as variáveis, destaca-se o potencial hídrico foliar.

O potencial de água da folha indica o estado energético, cujos gradientes explicam os fluxos da água no sistema solo-planta-atmosfera (BERGONCI et al., 2000). Normalmente ele é utilizado para medir o status hídrico das plantas.

O potencial hídrico foliar pode ser mensurado através de uma metodologia relativamente simples, descrita por Scholander et al., (1965). Este método é baseado na possibilidade de poder-se mensurar a pressão hidrostática da seiva xilemática em uma câmara de pressão e a partir daí, correlaciona-la com o potencial hídrico foliar. Por definição, é a medida da energia livre da água por unidade de volume, tendo seu valor expresso em pascal (Pa) ou como é mais utilizada, o megapascal (MPa). Apresenta grande influência no crescimento celular, fotossíntese e a produtividade.

Assim como o termômetro, para temperatura corporal humana, o potencial hídrico é um ótimo indicador geral do estado de saúde da planta. (TAIZ e ZEIGER, 2004).

De acordo com Tobin et al. (1999), o potencial hídrico de uma planta varia conforme sua espécie, variedade, época do ano e a hora do dia, tendo o menor valor do potencial observado ao meio dia, quando a transpiração é mais intensa. A Figura 1 expõe algumas mudanças fisiológicas que ocorrem de acordo com que o déficit hídrico aumenta.



Fonte: Taiz e Zeiger, 2004.

Figura 1. Mudanças fisiológicas devido a desidratação: potencial hídrico sob diferentes condições de crescimento e processos fisiológicos. A intensidade da coloração da barra corresponde a magnitude do processo.

Riboldi, (2014) ao estudar a cultura do milho submetida ao estresse hídrico, verificou uma diminuição do potencial de água na folha das plantas estressadas, quando comparada as plantas sem déficit hídrico por meio do monitoramento da pressão de turgor das folhas da planta. Liberato et al., (2006) também obtiveram redução do potencial hídrico em até 70% em plantas de acariquara (*Minquartia guianensis Aubl.*), submetidas a estresse hídrico, quando comparadas a plantas irrigadas com manejo adequado.

Avaliando o potencial hídrico em cana de açúcar, Vieira et al., (2014) observaram uma tendência de diminuição do potencial hídrico foliar à medida que se forneceu mais água à cultura. Para o tratamento com menor quantidade de água fornecida, houve maior potencial hídrico, evidenciando que a cultura sofreu maior estresse hídrico.

Mendes et al., (2007), avaliando o status hídrico das plantas quando submetidas à deficiência hídrica nas fases vegetativa e reprodutiva, observou que cultivares de feijão-de-corda sofreram reduções significativas no potencial hídrico foliar, com consequente aumento na temperatura da folha.

2.7 A Cultura da Berinjela

A berinjela (*Solanum melongena L.*) pertence à família das Solanáceas. A planta apresenta porte arbustivo, com caule semilenhoso e ereto, podendo atingir de 1,0 a 1,8m de altura. O sistema radicular pode atingir profundidade acima de 1,0m. As folhas são simples, com limbo foliar de formato ovado ou oblongo ovalado, e densa pilosidade. Seu fruto é uma boa fonte de sais minerais e vitaminas. Entre as propriedades medicinais, destaca-se o controle de colesterol no sangue. (FILGUEIRA, 2000).

Apresenta oferta e preço relativamente estável ao longo do ano, mesmo sendo uma espécie termófila, que necessita alta temperatura para o seu desenvolvimento vegetativo e reprodutivo (SOUSA et al., 1997). Por ser originária de clima tropical e subtropical, se desenvolve melhor em regiões com temperatura média de 25°C, podendo, dessa forma, ser cultivada durante todo ano. Temperaturas médias inferiores a 14°C inibem a floração e frutificação. (FILGUEIRA, 2000).

A colheita se inicia aos 100 dias da sementeira, podendo prolongar-se por mais 100 dias. Os frutos são colhidos antes do crescimento total, com 20-22 cm de comprimento. A cultura exige boa luminosidade e solos excessivamente úmidos prejudicam o crescimento, em virtude de deficiência de oxigênio para as raízes. A maior limitação para o cultivo é a umidade no solo inadequada durante o ciclo, como ocorre na maioria das hortaliças (MAROUELLI et al., 1996).

O cultivo da berinjela é tradicionalmente feito em campo aberto, com sistema de irrigação por aspersão, visto que, da família das solanáceas, a berinjela é menos susceptível a doenças na parte aérea (MAROUELLI 2014), quando comparada a outras culturas da mesma família, como o tomate e o pimentão, por exemplo. Contudo, cada vez mais os produtores têm adotado o cultivo em ambiente protegido que além de proporcionar um controle maior das condições edafoclimáticas, o cultivo protegido acaba permitindo que o plantio seja realizado em épocas de cultivo que não seriam adequadas para produção a céu aberto (PURQUERO e TIVELLI, 2006).

Para o cultivo protegido, o sistema de irrigação indicado é por gotejamento. Levando em consideração que a cultura apresenta moderada tolerância a seca, mas não tolera encharcamento, nos dois tipos de cultivo, tanto em campo aberto como em ambiente protegido, é imprescindível que o sistema de irrigação escolhido seja utilizado com manejo correto para obter uma elevada produtividade, de acordo com Marouelli, (2014).

A agricultura orgânica apresenta grandes desafios em relação ao cultivo convencional onde há utilização de agrotóxicos e a adubação química sintética, porém, de acordo com Raigón

et al. (2010) a cultura da berinjela se adapta bem ao manejo orgânico, principalmente por apresentar tolerância e resistência a muitas pragas e doenças que afetam outras hortaliças da mesma família, como o tomate e o pimentão.

Ghaemi et al. (2015) avaliaram o CWSI para a berinjela, no Iran, em diferentes intervalos de irrigação e níveis de salinidade da água tanto para cultivo protegido como em campo aberto. Todavia, na literatura, encontram-se poucos trabalhos que destacam o efeito do estresse hídrico na cultura da berinjela, sobretudo estudos com avaliação do índice de estresse hídrico da cultura.

3 MATERIAL E METODOS

3.1 Caracterização do experimento

O experimento foi conduzido no Centro Estadual de Pesquisa em Agricultura Orgânica do Rio de Janeiro (PESAGRO-RIO) localizado no município de Seropédica (latitude 22°48'00''S; longitude 43°41'00''W; altitude de 33 metros), no Estado do Rio de Janeiro, entre março e setembro de 2017. (Figura 2) A área possui aproximadamente 70 ha, e é caracterizada como um espaço destinado à experimentação agrícola sob o manejo agroecológico.

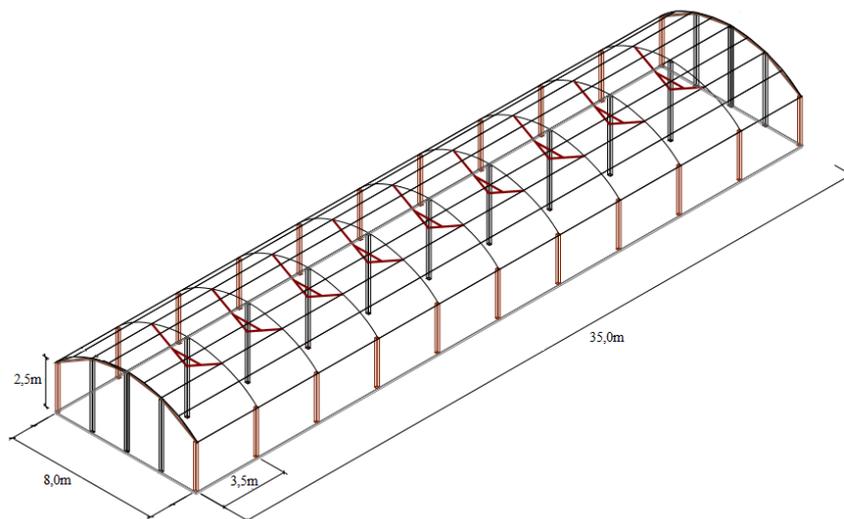


Figura 2. Imagem parcial do conjunto de casas de vegetação, localizado nas instalações da PESAGRO- RIO, Seropédica, RJ e visão interna da estufa após a instalação do experimento.

O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Aw, apresentando verão caracteristicamente chuvoso e inverno seco, com precipitação média anual em torno de 1.213 mm e temperatura média e mínima anual de 25,7°C e 19,6°C, respectivamente (GENUNCIO, 2009).

Com objetivo de controlar o regime hídrico, o experimento foi realizado em casa de vegetação, construída de acordo com o Informe Técnico 29 da Pesagro-Rio para estufas de baixo custo. O modelo ocupa uma área de 280m² (8m x 35m) distribuídos em 10 módulos de 3,5m de comprimento e pé direito de 2,5m, conforme ilustrado na Figura 3. A cobertura foi feita utilizando plástico agrícola de 150 micras e sombrite com nível de 30% de sombreamento

nas laterais. Com a cobertura evita-se a influência direta das chuvas, garantindo que toda água disponível para a cultura seja proveniente da irrigação. A área da estufa utilizada no experimento foi de 56m² (8m x 7m), ocupando os módulos centrais da estufa.



Fonte: PESAGRO-RIO.

Figura 3. Esquema estrutural e dimensional estufa baixo custo com área de 280m² (8m x 35m), construída de acordo com o Informe Técnico 29 da Pesagro-Rio.

A cultura escolhida para testar o protótipo proposto neste trabalho foi a berinjela (*Solanum melongena L.*), cultivar Nápoli. As sementes foram semeadas em bandeja de 200 células, preparadas com substrato orgânico, constituído por vermicomposto, fino de carvão vegetal e 2% de torta de mamona. Cada vaso recebeu uma muda, que foi transplantada 36 dias após semeadura.

A caracterização física do solo foi realizada por meio de análise granulométrica realizada pelo Laboratório de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, conforme exibido na Tabela 1.

Tabela 1. Análise física do solo utilizado no experimento.

Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Classe Textural
kg.kg ⁻¹				
0,43	0,157	0,051	0,106	Franco argilo arenoso

As mudas foram cultivadas em vasos de 18L, preenchidos com uma mistura de solo Franco argilo arenoso e 20% de substrato comercial orgânico. Foi feita também a correção da acidez e adubação inicial do solo para a berinjela de acordo com as recomendações de Ribeiro et al. (1998), a partir da análise química do solo (Tabela 2), seguindo o manejo orgânico de produção, com aplicação de calcário dolomítico PRNT 95,0%, termofosfato 16,5 % de P₂O₅ e sulfato de potássio 50,0% de K₂O.

Tabela 2. Análise Química do solo.

pH	P	K	Ca ²⁺	Mg	Al	H + Al	MO
	---mg.dm ⁻³ ---		-----cmolc.dm ⁻³ -----				dag.kg ⁻¹
4,97	17,1	68	1,89	1,26	0,1	2,4	0,89

Para promover a aeração adequada foi confeccionado, em cada vaso, um sistema de drenagem no fundo, com cerca de 3,0 cm de brita 01, sendo utilizada manta geotêxtil (bidim) para a separação do solo do sistema de drenagem e contenção do solo.

O experimento foi disposto por 7 linhas com 8 vasos cada, resultando em 56 vasos no total, considerando a margem externa como bordadura. Os vasos foram dispostos com espaçamento de 0,7m entre plantas e 1m entre as linhas, de acordo como exibido na Figura 4.

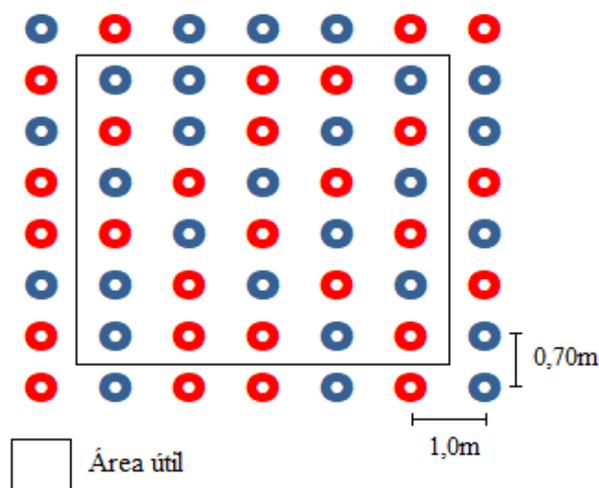


Figura 4. Disposição dos vasos dentro da estufa. Os vasos em azul (T1), representam as plantas sem déficit hídrico. Já os vasos em vermelho (T2), representam as plantas que foram submetidas ao estresse hídrico.

3.2 Sistema de Irrigação

A irrigação da cultura foi realizada por sistema de irrigação localizada, por gotejamento, com o gotejador autocompensante NETAFIM, com vazão 4Lh^{-1} . Cada tratamento dispôs de um sistema isolado do outro, possibilitando que a irrigação pudesse ser feita separadamente em cada tratamento, como mostrado na Figura 5 e exemplificado na Figura 6.

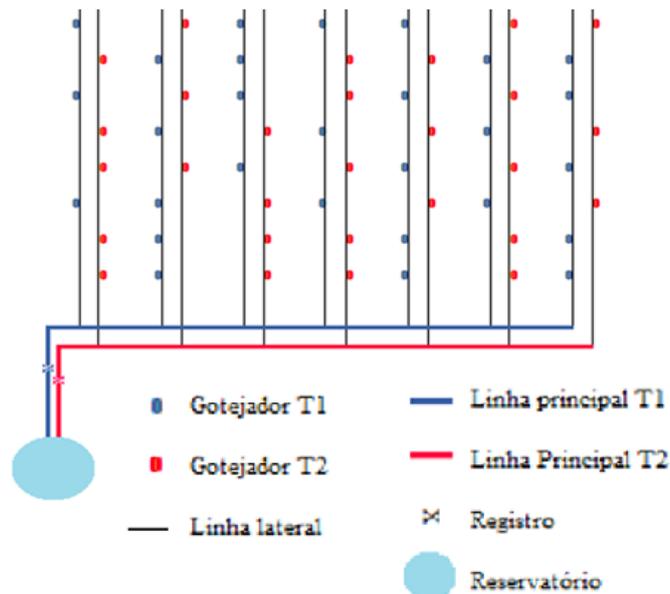


Figura 5. Croqui do sistema de irrigação por gotejamento utilizado. Os gotejadores em azul (T1) se localizam no centro do vaso, à esquerda. E os gotejadores em vermelho (T2) estão no centro no vaso, à direita. As linhas laterais de cada tratamento se conectam as suas respectivas linhas principais, controladas de forma manual por meio de uma válvula.



Figura 6. Detalhe da disposição dos gotejadores no vaso: o gotejador está instalado apenas na linha lateral correspondente ao tratamento, neste caso, T2, à direita.

3.3 Tratos culturais e adubação complementar

Os tratos culturais foram feitos durante todo o ciclo da cultura, conforme necessário, proporcionando um ambiente propício para que a cultura pudesse se desenvolver livre de pragas e doenças, dentro do possível.

O manejo utilizado foi feito com base na produção orgânica. Para controle de pragas foi realizada a pulverização semanal com calda sulfocálcica, na concentração de 0,5%. Como adubação complementar, foi feita a pulverização com o fertilizante orgânico Agrobio na concentração de 1%, uma vez a cada 30 dias e adubação de cobertura com torta de mamona em 63 DAT e 120 DAT. Também foi feita a retirada manual de daninhas nos vasos e a capina entrelinhas.

3.4 Aplicação dos Tratamentos

A aplicação dos tratamentos teve início aos 90 dias após o transplantio das mudas, em que as plantas apresentavam em torno de 0,5m de altura (Figura 7).



Figura 7. Porte da planta no início da aplicação dos tratamentos em 90 DAT, apresentando altura média de 0,5m.

Foram monitoradas 30 plantas de berinjela, sendo metade delas pertencente ao tratamento irrigado (T1), em azul, onde as plantas foram mantidas próximas a capacidade de

campo durante todo o ciclo. Já no tratamento não irrigado (T2), em 50% das plantas, representado pela cor vermelha, houve interrupção da irrigação no primeiro dia do ciclo, a partir de uma condição hídrica próxima a capacidade de campo, até as plantas alcançarem um potencial hídrico, caracterizando estresse hídrico severo para a berinjela, para o tipo de solo utilizado.

Posteriormente a essa condição se manifestar nas primeiras plantas do T2, marcando o final do ciclo, eram realizadas as análises e a irrigação era retomada em todas as plantas. Dessa forma, todas as plantas eram mantidas sem déficit hídrico por ao menos, 2 dias, antes de se iniciar um novo ciclo.

As plantas foram submetidas a sete ciclos, com duração entre dois e três dias por ciclo (Tabela 3), variando conforme as condições climáticas do referido período.

Tabela 3. Período correspondente a cada ciclo analisado. O início do ciclo corresponde a data em que T1 e T2 se apresentavam sem déficit hídrico. Já no fim do ciclo T1 permanecia sem déficit hídrico e T2 estava sob estresse.

Ciclo	Início	Fim
1º	10/jul	13/jul
2º	17/jul	20/jul
3º	24/jul	27/jul
4º	31/jul	03/ago
5º	08/ago	10/ago
6º	28/ago	30/ago
7º	04/set	06/set

Todas as análises foram feitas em todas as plantas no primeiro dia do ciclo, quando todas as plantas estavam com a umidade próxima a capacidade de campo e no último dia do ciclo, em que T2 estava sob estresse hídrico.

3.5 Temperatura da folha

Para avaliação da temperatura foliar foi utilizado um protótipo elaborado no Laboratório de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Norte Fluminense-Darcy Ribeiro (UENF).

O protótipo proposto era composto por um módulo sensor e outro módulo de controle e armazenamento de dados. Os dois módulos eram conectados entre si por um cabo de 6 vias. No módulo sensor foram montados um sensor de infravermelho, um sensor de temperatura do ar e umidade relativa (modelo DHT11) em um tubo de PVC com as extremidades abertas, para permitir a circulação do ar ambiente entre os sensores e também permitir que o sensor de IV captasse a luz da superfície alvo.

No módulo controle e armazenamento, foram arranjados uma placa arduino, um módulo temporizador e armazenamento de dados com cartão de dados, e uma tela sensível ao toque, para visualização dos dados e controle o equipamento. O conjunto foi alimentado por uma bateria de 9V.

O sistema foi programado utilizando o ambiente de programação fornecido pelo fabricante da placa Arduino e utilizando linguagem C++.

As medições de temperatura foliar foram realizadas no terço superior da planta, utilizando as folhas que se encontravam expostas ao sol e com angulação semelhante em relação ao plano vertical. Foram feitas quatro repetições por planta, sendo avaliadas seis plantas de cada tratamento. As análises foram realizadas sempre na parte da manhã, entre 9:00h e 11:30h.

A primeira medição de temperatura foi realizada com a folha úmida (T_w), “molhando” a folha, em uma situação onde é simulado que a folha está completamente hidratada, logo, sem déficit hídrico (Figura 8a). Posteriormente foi realizada em outra folha a medição da temperatura da folha (T_c), bem como à temperatura do ar (T_a) e umidade relativa do ar (UR) (Figura 8b). Com os dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar, o próprio aparelho calculou o déficit de pressão de vapor.

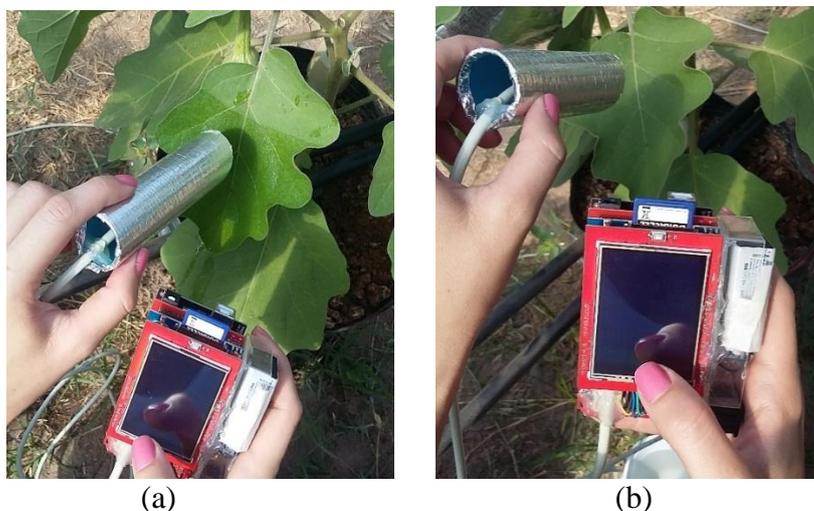


Figura 8. Medição da temperatura úmida da folha (T_w) simulando uma situação em que a folha se apresenta sem déficit hídrico (a). Medição temperatura da folha (T_c) (b).

3.6 Crop Water Stress Index (CWSI)

Por meio dos dados da temperatura da folha, temperatura do ar e umidade relativa do ar, obtidos por meio do protótipo, foi possível calcular o déficit de pressão de vapor e com ele o *Crop Water Stress Index* (CWSI), o índice de estresse hídrico da cultura. O CWSI foi calculado conforme a metodologia proposta por Jackson et al. (1981) e Idso et al. (1981) de acordo com a Equação 1.

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

Em que:

T_c - temperatura da folha representando o dossel, (°C);

T_{ar} - temperatura média do ar, (°C);

$(T_c - T_{ar})_{LBI}$ - 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 a temperatura da superfície molhada, (°C);

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

3.6.1 Índice de estresse hídrico da cultura medido ($CWSI_{med}$)

O cálculo do CWSI foi determinado de duas formas distintas. Na primeira delas, a determinação da linha base de temperatura inferior, $(T_c - T_{ar})_{LBI}$, foi feita levando em consideração a temperatura da folha úmida medida (T_w) através do procedimento de umedecer a folha. Aplicando T_w na Equação 1 gerou-se o CWSI medido ($CWSI_{med}$), como é apresentado na Equação 2.

$$CWSI_{med} = \frac{(T_c - T_{ar}) - (T_w - T_{ar})_{LBI}}{(T_c - T_{ar})_{LBS} - (T_w - T_{ar})_{LBI}} \quad (2)$$

Em que:

$CWSI_{med}$ = Índice de estresse hídrico calculado com a T_w medida; e

T_w = Temperatura da folha úmida medida (°C).

3.6.2 Índice de estresse hídrico da cultura estimado ($CWSI_{est}$)

Para determinar o limite inferior da equação para o $CWSI$ estimado ($CWSI_{est}$), foi utilizada a metodologia proposta por Idso et al. (1981), que utiliza o DPV para o cálculo do coeficiente, conforme descrito na Equação 3.

$$(T_c - T_{ar})_{LBI} = (T_c - T_{ar})_{LBS} \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) - \left(\frac{DPV}{\Delta + \gamma} \right) \quad (3)$$

Em que:

T_c - temperatura da cultura, (°C);

T_{ar} - temperatura média do ar, (°C);

$(T_c - T_{ar})_{LBI}$ - linha base de temperatura inferior, (°C);

$(T_c - T_{ar})_{LBS}$ - linha base de temperatura inferior, (°C);

γ - constante psicométrica, (kPa °C⁻¹);

Δ - é a declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água, (kPa.°C⁻¹);

DPV - Déficit de pressão de vapor, (kPa).

O $(T_c - T_{ar})_{LBS}$ é pouco influenciável pelo DPV, porque a cultura, estando em uma situação de estresse hídrico, transpira pouco. Este valor está situado entre 4°C e 5,1°C para a cultura do milho, de acordo com Irmak et al. (2000). Sepaskhah e Kashefipour (1994) encontraram o valor médio de 5°C para o limão doce. Dessa forma, adotou-se o valor de 5°C para $(T_c - T_{ar})_{LBS}$.

Portanto, foi possível calcular o $(T_c - T_{ar})_{LBI}$ conforme a equação abaixo.

$$(T_c - T_{ar})_{LBI} = 5 \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) - \left(\frac{DPV}{\Delta + \gamma} \right) \quad (4)$$

O déficit de pressão de vapor é a diferença entre a pressão de saturação de vapor de água e a pressão parcial de vapor. O DPV foi determinado por meio das medidas de temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%), obtidas através do protótipo, e calculado por intermédio das Equações 5, 6 e 7.

$$DPV = e_s - e_a \quad (5)$$

Em que:

e_s - pressão de saturação de vapor de água no ar (kPa);

e_a - pressão parcial de vapor de água (kPa);

$$e_s = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{7,5 \cdot T}{237,5+T}\right)} \quad (6)$$

Em que:

e_s - pressão de saturação de vapor de água no ar, (kPa);

T - temperatura do ar, (°C).

$$e_a = \frac{UR(\%)}{100} \cdot e_s \quad (7)$$

Onde:

e_s - pressão de saturação de vapor de água no ar (kPa);

e_a - pressão parcial de vapor de água (kPa);

UR - umidade relativa do ar (%).

3.7 Potencial de água na folha

Para determinar o potencial de água na folha foram efetuadas medidas utilizando uma Câmara de Scholander (Modelo 3005, Soil Moisture Equipment Corporation, Santa Bárbara, CA, EUA). Para isso, foram coletadas as folhas das plantas sempre nos horários próximos de meio dia (entre 11 e 13h). As análises de potencial hídrico foliar foram feitas em três plantas de cada tratamento, em duplicata, coletando duas folhas de cada vaso, devidamente expandidas, maduras e localizadas no terço médio das plantas. As amostras foram acondicionadas em sacos

plásticos fechados, cobertos por papel alumínio e transportadas em caixa de isopor com bolsa de gelo e encaminhadas para o Laboratório de Fisiologia Vegetal, no Prédio de Química da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, que se localiza próximo à área experimental (Figura 9).



(a)



(b)

(c)

Figura 9. Câmara de pressão de Scholander prestes a ser utilizada para medir o potencial de água na folha da berinjela (a); Câmera com a folha posicionada, aguardando o início da medição do potencial hídrico (b); Análise do potencial hídrico, aguardando a exsudação da água retida na folha, com auxílio de uma lupa (c).

Em laboratório foi feito um corte transversal na extremidade do pecíolo para melhorar a visualização da exsudação da água da folha. Após o corte no pecíolo, a folha é inserida na câmara e então é aplicada a pressão até o momento em que ocorre o início da exsudação da água retida na folha. Esse é o momento em que a pressão exercida pela bomba se iguala e

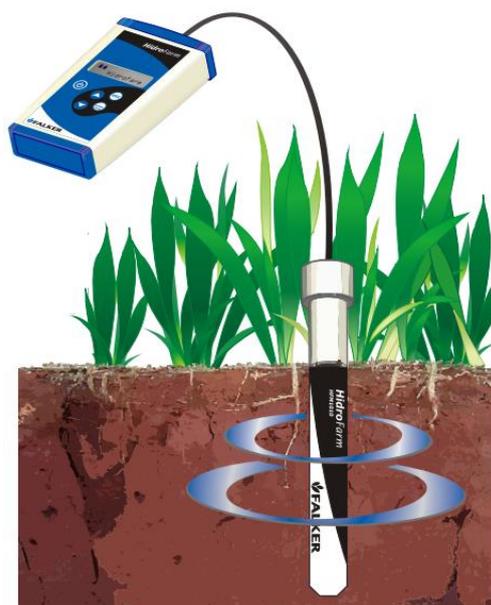
começa a sobressair a pressão de turgescência da folha, correspondente ao valor do potencial hídrico.

Com os dados coletados foram feitas as médias de potencial de água na folha de cada planta, em cada dia de avaliação.

As análises foram realizadas no início e no final de cada ciclo. Os dados coletados foram submetidos à análise de regressão, tendo como variável independente o índice de estresse hídrico da cultura estimado (CWSIest).

3.8 Umidade do Solo

O manejo da irrigação foi realizado com base na umidade do solo, sendo a mesma monitorada com um medidor eletrônico Hidrofarm, modelo HFM 2010, que realiza a leitura pela tecnologia ISAF (impedância do solo em alta frequência). Este sensor é composto de uma unidade sensora, um medidor, e um cabo para realizar a comunicação entre os dois (Figura 10).



Fonte: Falcker (2010), adaptado.

Figura 10. Esquema representativo da medição de umidade feita, por tecnologia ISAF, (impedância do solo em alta frequência).

Cada unidade sensora tem a capacidade de armazenar localmente as configurações, o que possibilita que o mesmo medidor possa ser conectado a diversas unidades sensoras sem que isso afete sua precisão. Além disto, o medidor apresenta uma capacidade de memória para armazenar até 30 medições. (FALKER, 2010).

Os sensores de umidade do solo foram instalados logo após o transplântio das mudas. E inseridos nos vasos ao lado contrário do gotejador, para evitar o contato direto com o mesmo, o que se poderia levar a ter uma leitura equivocada. (Figura 11).



Figura 11. Posição do sensor de umidade do solo instalado no vaso (a). Momento da medição da umidade do solo (b).

3.8.1 Calibração sonda de Umidade do Solo

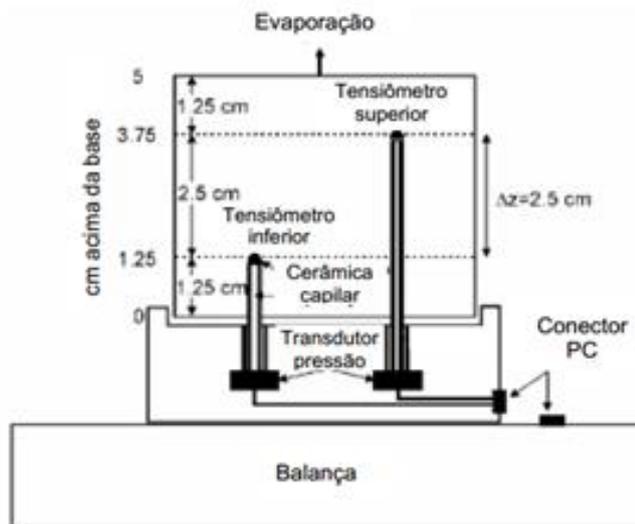
Para avaliação dos valores das leituras de umidade informados pelo aparelho HydroFarm, os mesmos foram comparados com os resultados obtidos pelo método da estufa (gravimétrico) e analisados pela equação de ajuste ($Y = a + bx$) e pelo coeficiente de correlação (r).

3.8.2 Curva de Retenção de Água no Solo

A análise de retenção de água do no solo foi feita no Laboratório de Recursos Hídricos da UFRRJ. O ensaio foi feito utilizando o equipamento HYPROP. Para tal foi utilizado o solo contido em um dos vasos utilizados no experimento, colocado dentro de um anel metálico. Posteriormente saturou-se o corpo de prova em água deionizada. Neste equipamento, a sucção matricial é monitorada pelos tensiômetros posicionados em 1,25 e 3,75 cm, tendo as medidas das sucções dadas a cada minuto durante a primeira hora, seguidos de intervalos de 10 minutos até o final do ensaio; o mesmo para o peso registrado pela balança de precisão. Foram utilizados

anéis de 250 mL de 8 cm de diâmetro por 5 cm de altura; e as amostras saturadas da base para o topo.

A avaliação de medição HYPROP segue o método de evaporação simplificado (SCHINDLER, 1980). O método usa as mudanças de peso de amostras e as medições de potencial matricial nas amostras durante um processo de secagem, causada pela evaporação, para derivar as funções hidráulicas dos solos. A Figura 12 traz uma representação esquemática desse equipamento, constituído por uma unidade sensora onde se encontram os transdutores de pressões nos quais são acoplados os dois tensiômetros. No final do ensaio foi determinado o peso seco da amostra que foi levada para estufa a 105 °C por 24 horas.



Fonte: SCHINDLER et al, 2010 (modificado)

Figura 12. Representação esquemática do aparelho HYPROP, utilizado para a análise de retenção de água no solo.

3.9 Delineamento Experimental e Análise Estatística

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), com os tratamentos, com 2 tratamentos e 15 repetições, onde (T1), em azul, representa as plantas sem déficit hídrico e (T2), em vermelho, representa as plantas que foram submetidas ao estresse hídrico. As análises foram submetidas ao teste de regressão simples.

Os valores estimados foram comparados com os valores medidos. Avaliou-se o desempenho dos modelos de estimativa pelo índice de confiança “c” proposto por Camargo e

Sentelhas (1997), obtido pelo produto do coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância de Willmott (d), proposto por (Willmott, 1981) (Equação 8).

$$c = r * d \quad (8)$$

Em que:

c - índice de confiança ;

r - coeficiente de correlação;

d - índice de concordância de Willmott.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(Pi-Oi)^2}{\sum(|Pi-O|+|Oi-O|)^2} \right] \quad (9)$$

Em que:

d - índice de concordância de Willmott;

Pi – valor estimado;

Oi – valor medido;

O – média dos valores medidos.

Para avaliação do método proposto por Camargo e Sentelhas (1997) foi utilizada a classificação de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4. Critério de interpretação do desempenho dos modelos de estimativa pelo índice de confiança “c” proposto por Camargo e Sentelhas, (1997).

Valor de "c"	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dados Meteorológicos

Os valores de temperatura máxima, média e mínima, assim como a umidade relativa e radiação solar foram registrados pela estação Ecologia Agrícola do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET localizada ao lado da área experimental. Os dados obtidos durante o período em que foi conduzido o experimento, estão apresentados na Figura 13 e 14. A temperatura mínima diária oscilou entre 11,4 °C (7 de agosto) e 20,7 °C (15 de agosto). A temperatura média diária variou entre 17,0 °C (06 de agosto) e 27,2 °C (9 de agosto). A temperatura máxima diária variou entre 18,8 °C (19 de julho) e 35,7 °C (09 de agosto).

A temperatura no período das análises apresentou-se relativamente mais baixa que a média anual para a região, isto é, devido ao fato das avaliações terem sido realizadas durante os meses de julho, agosto e início de setembro, compreendendo o período de o inverno. Contudo, as condições climáticas não interferiram para o desenvolvimento da cultura da berinjela, visto que seu plantio e estabelecimento foi realizado de março a junho, quando as temperaturas se apresentavam mais elevadas, dentro das condições adequadas para o crescimento e frutificação da cultura, de acordo com Filgueira, (2000). As avaliações iniciaram-se aos 90 DAT.

O valor de umidade relativa durante a realização do experimento foi de 66,5% oscilando entre a máxima de 90,0% (5 de setembro) e a mínima de 53,0% (8 de agosto). A radiação solar variou de 2,74 MJ m⁻² d⁻¹ (18 de agosto) a 22,53 MJ m⁻² d⁻¹ (5 de setembro) e teve uma média de 15,41 MJ m⁻² d⁻¹ durante o período das análises.

Tanto em condições naturais, a campo aberto, quanto em casa de vegetação, com o aumento da radiação, espera-se um aumento da temperatura e uma queda na umidade relativa do ar (MEDINA, MACHADO, GOMES, 1999) levando a uma demanda atmosférica por água. Foi encontrado, conforme esperado, uma relação inversamente proporcional entre a radiação e a umidade relativa do ar, como pode ser observado na Figura 13, onde os maiores valores para umidade relativa do ar coincidem com os menores valores para a radiação solar.

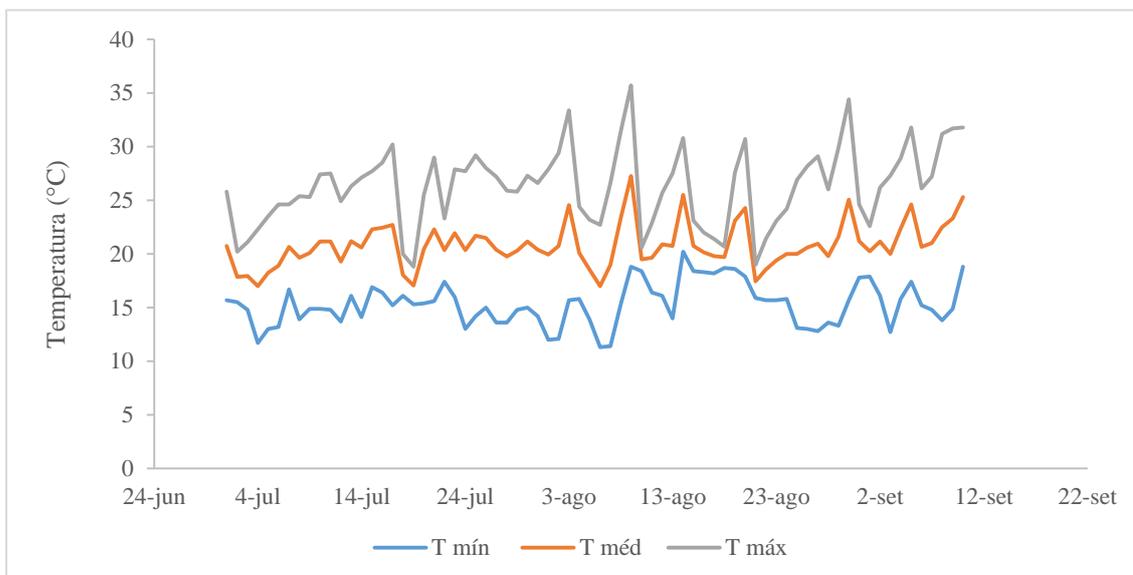


Figura 13. Variação diária da temperatura máxima, mínima e média durante o período do experimento.

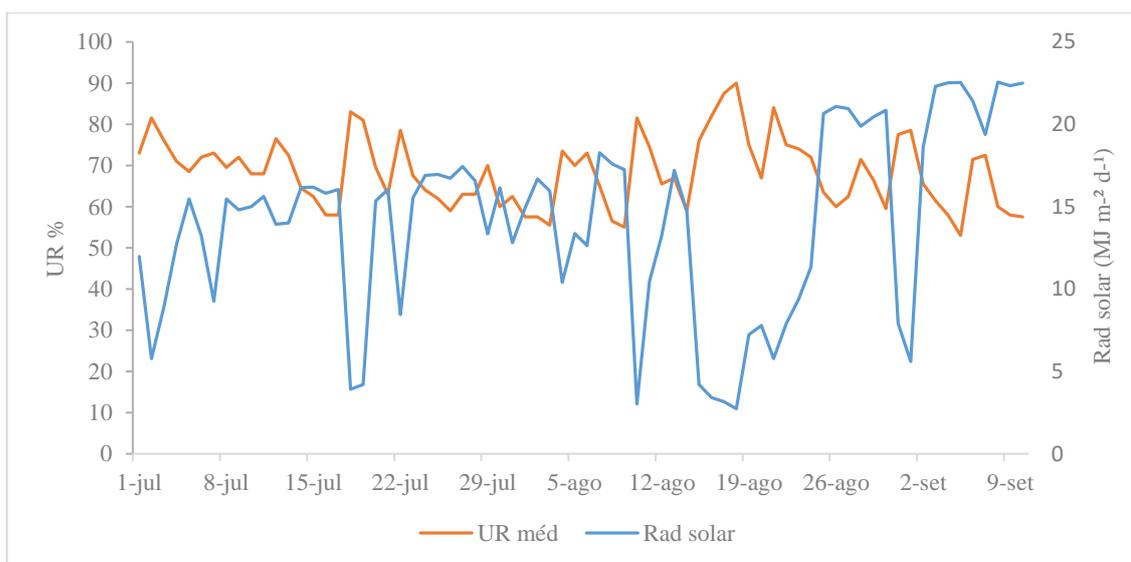


Figura 14. Variação diária da radiação solar global e da umidade relativa média durante o período do experimento.

4.2 Curva de Retenção de Água no Solo

Por meio do ensaio no HYPROP, e após avaliação pelo programa HYPROP-FIT, foi possível obter os parâmetros da curva de retenção de água no solo, sendo o melhor ajuste alcançado com o modelo Van Genuchten-Mualem (1980), (VGmn-3100) (Figura 15). Foram

encontrados os valores de 54,5% para o parâmetro θ_s e o valor de 33,3% para θ_r . O parâmetro θ_s define a assíntota superior da curva de retenção ajustada, representando o conteúdo saturado de água no solo; e θ_r define a assíntota inferior da curva, representando o conteúdo residual de água no solo (Tabela 5). O parâmetro n reflete a forma da curva e o parâmetro α é afetado pelo valor da tensão de água no solo.

Tabela 5. Parâmetros obtidos na análise de retenção do solo pelo programa HYPROP-FIT com melhor ajuste em Van Genuchten-Mualem (1980) (VGmn-3100).

θ_s	θ_r	α	m	n
$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$		-----adimensional----		
0,549	0,333	0,00349	1	0,733

Com a determinação da curva foi possível obter os valores para a capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PM), sendo $0,49 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $0,34 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectivamente.

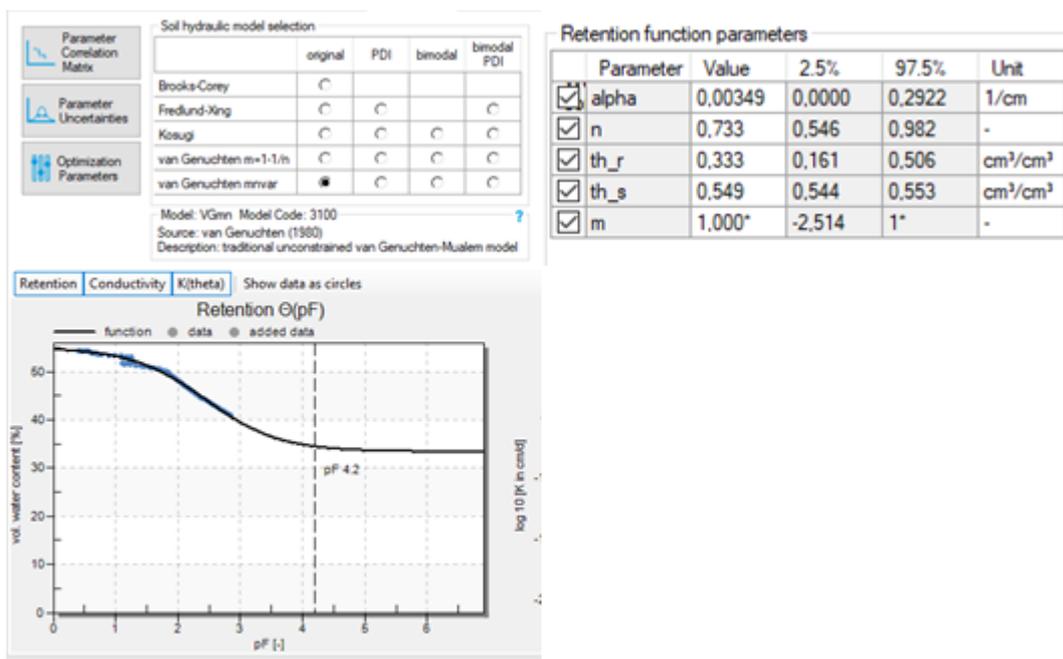


Figura 15. Curva de retenção do solo obtida através do programa HYPROP-FIT, tendo melhor ajuste em Van Genuchten-Mualem (1980) (VGmn-3100) e parâmetros utilizados. Obtendo para $0,49 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para a CC e $0,34 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para PM.

4.2 Calibração Sonda de Umidade do Solo

A equação de calibração ajustada por análise de regressão, indicou que os valores umidades apresentados pelo equipamento ajustaram significativamente com os valores obtidos pelo método gravimétrico, apresentando um coeficiente de determinação satisfatório ($R^2=0,82$). (Figura 16).

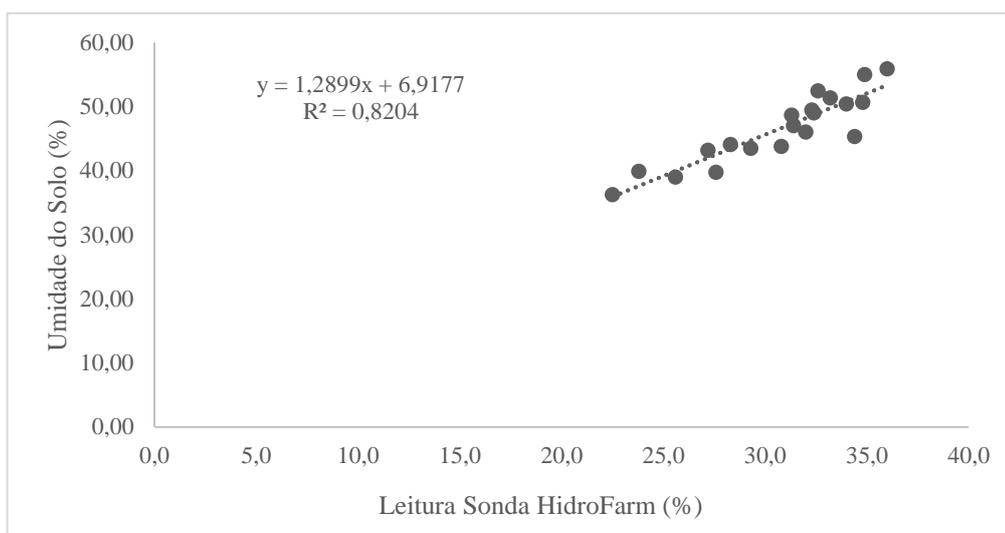


Figura 16. Calibração da sonda HidroFarm para umidade do solo por meio do método gravimétrico.

Com os valores de umidade corrigidos por meio da calibração foi possível programar as irrigações nos tratamentos T1 e T2 para alcançar a capacidade de campo, obtida por meio a curva de retenção.

4.4 Determinação da Linha Base Inferior (LBI)

Pôde-se observar, ao longo do experimento, que as condições de temperatura e umidade permitiram estabelecer uma relação matemática entre a temperatura do ar e o déficit de pressão de vapor. (Figura 17). As medições foram realizadas sempre entre 10:00 h e 14:00 h, um período relativamente curto, em que não ocorreram grandes variações climáticas. As condições permitiram pequena variação no conteúdo médio de vapor no ambiente interno da casa de vegetação. Isto pode indicar porque há uma relação linear entre a temperatura do ar e o déficit

de pressão de vapor. Esta relação será utilizada para estimar a linha, de forma contínua, da variação da temperatura da linha base em relação ao déficit de pressão de vapor $(T_c - T_{ar})_{con}$.

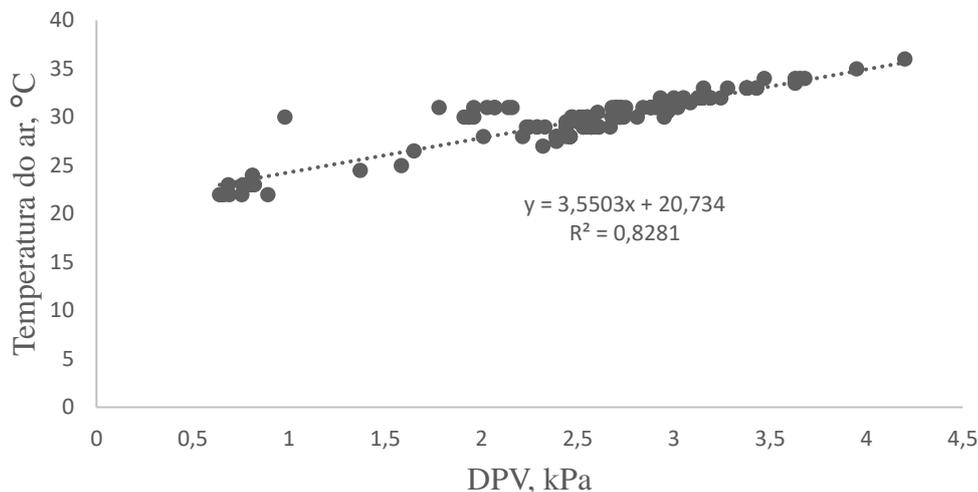


Figura 17. Análise do déficit de pressão de vapor (kPa) com relação a temperatura do ar (°C), mostrando que há uma relação linear entre as variáveis.

Desta forma, o valor da temperatura da linha base inferior foi obtido de três maneiras. Primeiramente foi utilizada a temperatura úmida da folha medida em campo, (T_w) ou $(T_c)_{med}$ conforme a equação 2. Segundo, a linha base foi determinada com base nos dados de temperatura do ar e de DPV medidos pelo protótipo $(T_c - T_{ar})_{est}$, conforme a equação 4, e posteriormente a linha contínua, $(T_c - T_{ar})_{con}$, obtida a partir da relação DPV-Tar (Figura 14). Ressalta-se que na estimação da linha base inferior baseado na equação 4, fixou-se a temperatura da linha base superior, independente do DPV, no valor de $(T_c - T_{ar})_{LBS} = 5^\circ\text{C}$.

É possível verificar, pela Figura 18, que os valores estimados da diferença $(T_c - T_{ar})$ tem ajustamento satisfatório com a variação dos valores medidos, em relação à variação do DPV.

A dispersão ocorrida em $(T_c - T_{ar})_{med}$ provavelmente está associada a dificuldade de execução do método, a qual implica em “molhar” antes da medição da temperatura, simulando uma situação em que a folha estaria sem déficit hídrico, uma vez umedecida.

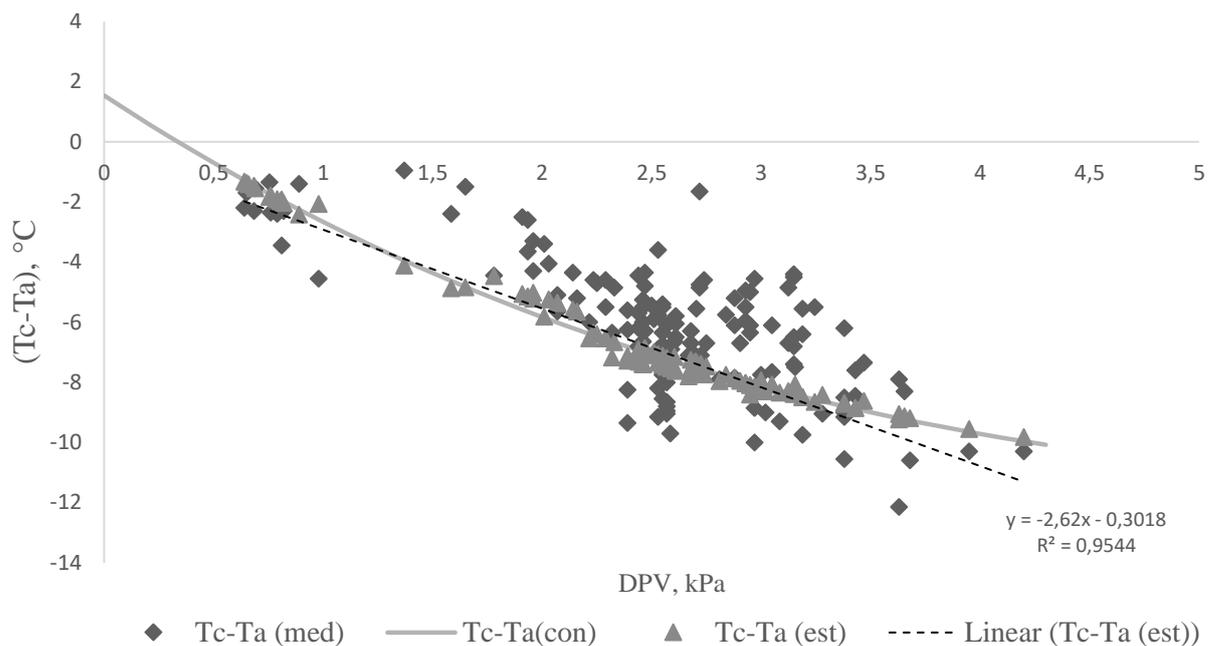


Figura 18. Análise entre as linhas base inferior $(Tc-Tar)_{med}$, $(Tc-Tar)_{con}$, e $(Tc-Tar)_{est}$, correlacionadas com o DPV.

Avaliando o desempenho de ajustamento dos valores estimados, caracterizado pelos índices de correlação ($r = 0,75$), de Wilmott ($d = 0,83$) e de confiança de Camargo ($c = r.d = 0,62$), o desempenho do modelo de estimação pode ser classificado como “Mediano”.

Para a cultura da berinjela em ambiente protegido, foi encontrada para este estudo a relação $(Tc-Ta) = -0,30 - 2,62DPV$ ($r^2=0,95$).

Isdo (1982) demonstrou que o limite inferior do CWSI é uma função linear do DPV para 26 diferentes culturas, em diferentes localidades, com solos diversos. Para a leguminosa alfafa (*Medicago sativa L.*) foi obtida a relação $(Tc-Ta) = 0,51 - 1,92DPV$ para cultivo em campo aberto, onde $(Tc-Ta)$ está em $^{\circ}C$, e o DPV em kPa. Para a cultura do tomate (*Lycopersicon esculentum*) foi encontrada a relação $(Tc-Ta) = 2,86 - 1,96DPV$ também para cultivo em campo aberto. Enquanto López et al. (2009) encontraram a relação $(Tc -Ta) = 1.21 - 1.31DPV$ ($r^2 = 0.68$, $P < 0.01$, $n=42$) para o tomate de cascara (*Physalis ixocarpa*), no México. Para o cultivo de milho, Irmak et al. (2000) encontraram a relação $(Tc-Ta) = 1,39 - 0,86DPV$ ($r^2= 0,92$), com uma média de $4,6^{\circ}C$ para o limite superior. Para a melancia (*Citrullus vulgaris*), Orta et al, (2003) obtiveram os valores de intercepto e inclinação da reta de regressão linear de 0,47 e 1,20, respectivamente. Erdem et al. (2010) encontraram $(Tc -Ta) = 4,63 - 2,5762DPV$ para o brócolis cultivado na Turquia durante a primavera e o outono.

Observa-se que as relações variam bastante, corroborando com os resultados obtidos por Bucks et al. (1985), onde os autores destacam que os valores dos interceptos e da inclinação a reta na regressão linear dependem da cultura cultivada, o clima e o tipo de solo utilizados.

4.5 Índice de estresse hídrico da cultura medido ($CWSI_{med}$) e estimado ($CWSI_{est}$)

Com os valores medidos de temperatura da folha umedecida, da temperatura do ar e da umidade do ar, e considerando a linha base superior de acordo com as equações 2 e 4, foi calculado o $CWSI_{med}$ e $CWSI_{est}$, respectivamente (Figura 19).

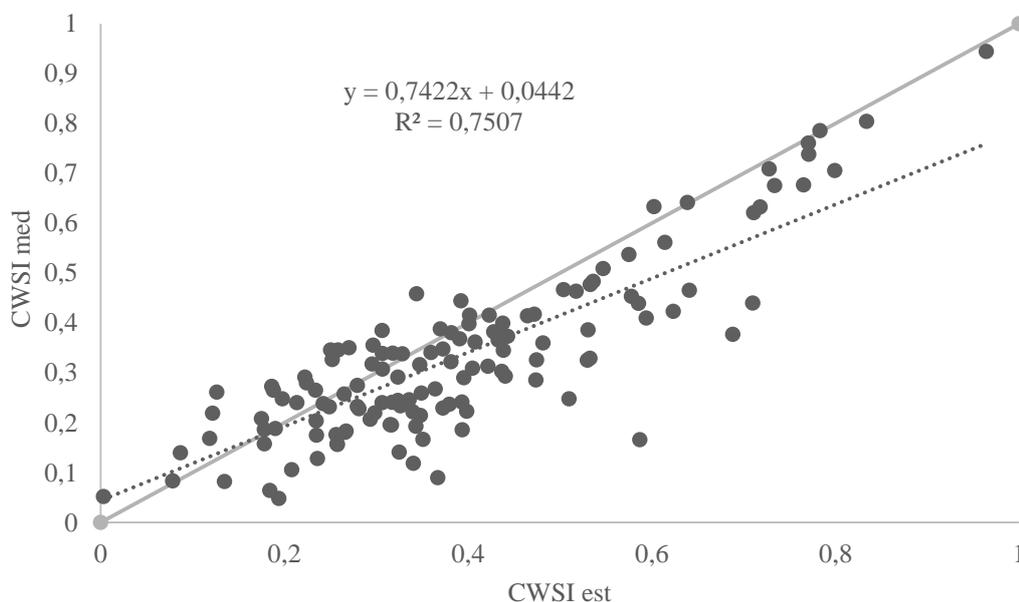


Figura 19. Avaliação entre o índice de estresse da cultura obtido por meio da temperatura úmida medida, $CWSI_{med}$ e estimado com base no DPV, $CWSI_{est}$.

Por meio da análise de regressão foi calculado o F de significação, com valor menor que 1%, dessa forma, foi constatado que há significância no modelo, havendo uma tendência linear e não aleatória ao correlacionar o $CWSI_{est}$ com o $CWSI_{med}$. Avaliando o desempenho de ajustamento dos valores estimados, caracterizado pelos índices de correlação ($r = 0,87$), de Wilmott ($d = 0,91$) e de confiança de Camargo ($c = r.d = 0,79$), o desempenho do modelo de estimação pode ser classificado como “Muito bom”.

Perante a dificuldade do método em determinar o LBI para o cálculo do $CWSI_{med}$, o que pode ser responsável pela dispersão observada nos dados obtidos, o $CWSI_{est}$ apresenta-se como uma alternativa para o cálculo do índice de estresse hídrico da cultura.

O ajustamento satisfatório obtido pode também ser explicado pelo fato do experimento ter sido realizado em casa de vegetação onde a circulação do ar é reduzida. Com a circulação de ar reduzida a resistência aerodinâmica ao transporte de calor sensível fica muito elevada, fazendo que a relação entre a resistência do dossel e a resistência aerodinâmica (r_s/r_a) tenda para zero (JACKSON, 1981; MAES E STEPPE, 2012). Isto faz com que a dinâmica do transporte de vapor no microambiente da casa de vegetação se aproxime da equação 4, que é simplificada e não leva em conta o termo r_s/r_a .

Haverá necessidade de testar o protótipo em condições de maior circulação de ar, com menor resistência aerodinâmica, para estender a aplicação do protótipo para campo aberto.

4.6 Índice de Estresse Hídrico da Cultura Estimado ($CWSI_{est}$) e a Umidade do Solo

O valor resultante da análise de retenção de água no solo para a capacidade de campo, através do ensaio no HYPROP, foi de $0,49 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Entretanto a umidade do solo medida pelo sensor HidroFarm alcançou valores acima da capacidade de campo. Essa diferença pode estar relacionada a um erro de medição, onde a mesma pode ter sido feita antes da água ser distribuída uniformemente em todo o vaso, superestimando a medição e conseqüentemente a umidade do solo. Todavia, apesar de uma possível superestimação, nota-se que há uma relação entre o $CWSI$ e a umidade do solo medida pelo sensor de umidade (Figura 20).

Existe uma alta dispersão no modelo, que pode estar associada a qualidade das medições com a sonda de umidade do solo e ao próprio $CWSI_{est}$. Porém, na análise de regressão se obteve um valor reduzido para o nível descritivo de ajuste do modelo P de $2,97 \cdot 10^{-19}$, indicando que o ajustamento é estatisticamente significativo, que o coeficiente de variação do modelo difere de zero, apesar do ajustamento incipiente.

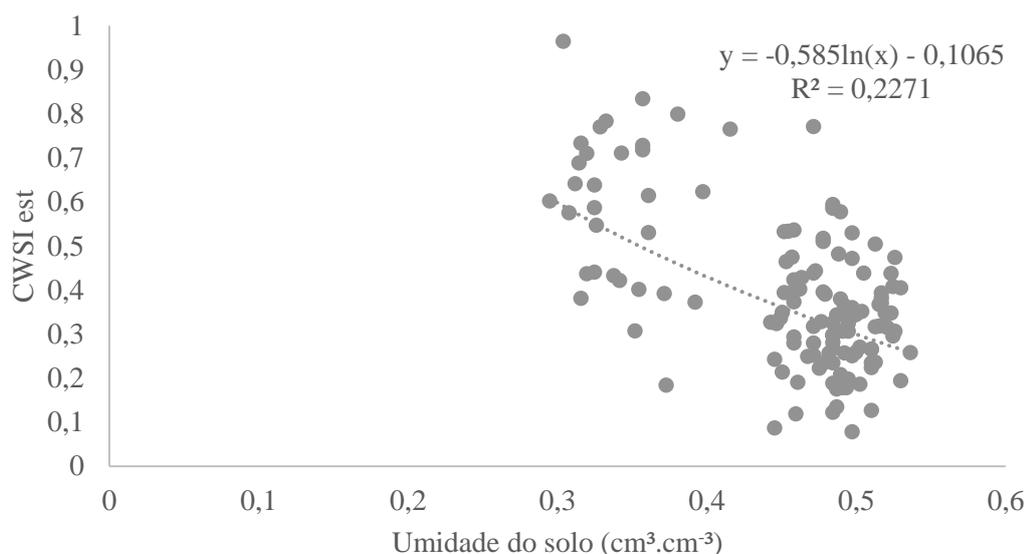


Figura 20. Índice de estresse hídrico da cultura estimado (CWSI_{est}) em função da umidade do solo (cm³.cm⁻³).

À medida que a umidade do solo cai, o CWSI aumenta, demonstrando que a planta está sendo exposta à restrição de água disponível. Sendo menor o acesso à água disponível no solo, menor a taxa transporte de água disponível para a planta reduzindo o suprimento de água para satisfazer a demanda atmosférica, dessa forma a planta é levada a fechar os estômatos para redução da transpiração. Consequentemente há um aumento da temperatura da folha (TAIZ e ZEIGER, 2004)

De acordo com Maggiotto (1996) a temperatura foliar também é associada a diminuição de umidade do solo, ou apenas, à diferença entre a absorção de água em relação à transpiração da cultura. Sendo assim, de maneira geral, a queda da umidade do solo está refletida no CWSI estimado utilizando o déficit de pressão de vapor.

Ghaemi et al. (2015) ao estudarem a berinjela, no Iran, em diferentes níveis de suprimento hídrico e salinidade da água, observaram que os valores de CWSI foram significativamente afetados pelo déficit de água na cultura. À medida que a planta era submetida a estresse hídrico o CWSI apresentava valores mais altos.

Erdem et al. (2010), ao avaliarem a relação entre o CWSI e a umidade do solo para a cultura do brócolis, em diferentes lâminas de irrigação, observaram que os níveis de irrigação mais baixos foram os que tiveram índices de estresse hídrico mais elevados, enquanto para lâminas de irrigação mais altas, o CWSI encontrado foi cada vez mais próximo de zero.

4.7 Índice de Estresse Hídrico da Cultura Estimado (CWSI_{est}) e o Potencial Hídrico Foliar

A resposta ao coeficiente de estresse hídrico também foi correlacionada com a condição hídrica da planta, através de análises realizadas diretamente nas plantas. O valor do CWSI é inversamente proporcional ao valor do potencial hídrico, ou seja, quanto menor o valor do potencial hídrico, mais próximo de 1 será o valor do CWSI.

O índice de estresse hídrico da cultura (CWSI) variou de 0,21 a 0,68 e o potencial hídrico foliar, variou de -0,21 MPa até -1,41 MPa. Foi observado que os valores estão bem correlacionados, conforme o modelo proposto e que apesar da dispersão ocorrida, os valores médios obtidos correlacionados seguem a linha de ajuste do modelo (Figura 21).

Para um potencial hídrico foliar de -0,6 Mpa foi encontrado o valor de 0,21 para o CWSI_{est}, já para uma situação com restrição hídrica observou-se a diminuição do potencial e aumento do CWSI_{est}, onde foram encontrados os valores e -1,39 Mpa para potencial hídrico e 0,68 para CWSI_{est}.

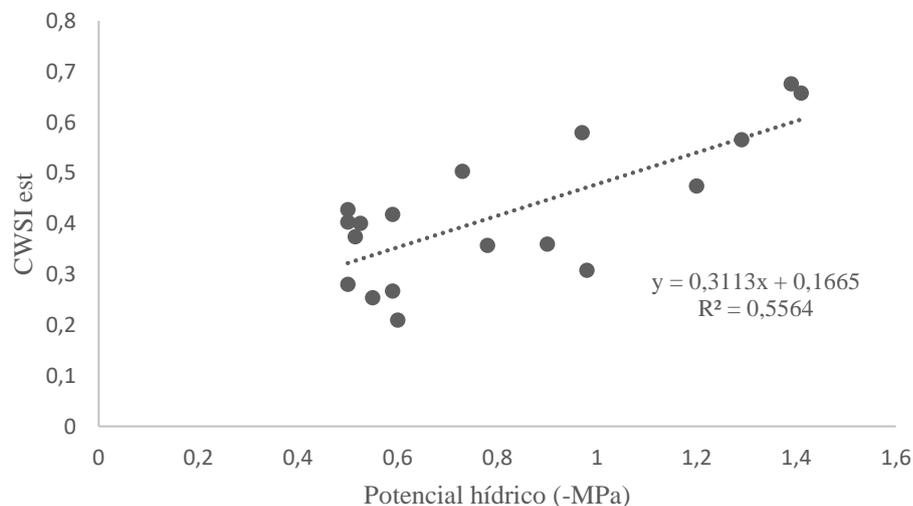


Figura 21. Relação entre o potencial hídrico foliar (-MPa) e o coeficiente de estresse hídrico foliar estimado (CWSI_{est}) para a cultura da berinjela.

Foi analisado o coeficiente de correlação de Pearson (r), que mede o grau da correlação linear entre as duas variáveis, variando de -1 a 1. O valor encontrado para r foi de 0,75; obtido através do teste de regressão linear.

Encontrar uma correlação positiva próxima de 1, entre as variáveis, significa dizer que quando o $CWSI_{est}$ assume valores mais altos, próximos de 1 o potencial hídrico, diminui, assumindo valores cada vez mais baixos, em -Mpa. O que indica, neste caso, uma situação onde há estresse hídrico. Da mesma forma, quando o potencial hídrico aumenta, espera-se encontrar o coeficiente de estresse hídrico mais baixo.

Vieira et al. (2014), avaliando o potencial hídrico em cana de açúcar, também observaram uma tendência de aumento do potencial hídrico foliar à medida que a planta se encontrava com mais água disponível. Em contrapartida, à medida que a planta foi submetida ao déficit hídrico, houve redução potencial hídrico, evidenciando que a cultura sofreu maior estresse hídrico.

O resultado também corrobora aos encontrados por López et al. (2009) com tomate cascara no México, Erdem et al. (2010) para brócolis na Turquia, Taghvaeian et al. (2012) com milho nos EUA, Ghaemi et al. (2015), com berinjela no Iran, Erdem et al. (2005) na Turquia com melancia, onde foi possível verificar que em condições de restrição hídrica são encontrados maiores valores de CWSI.

Muitas vezes, os menores valores de CWSI encontrados ficaram acima de 0,3, mesmo com a reposição hídrica adequada para a cultura neste tipo de solo. De acordo com Silva (2017) este fato pode ser uma evidência de que a cultura, nas horas mais quentes do dia, para as condições edafoclimáticas apresentadas, não foi capaz de atender a alta demanda hídrica da atmosfera, mesmo com a umidade ideal no solo. O mesmo resultado foi encontrado por Marin et al. (2005) para a cultura do café e por Marin e Angelocci (2011) na lima ácida Taiti.

De acordo com o estudo, entende-se que há possibilidade de se determinar o “status hídrico” da planta com o $CWSI_{est}$ utilizando um protótipo capaz de medir a temperatura da folha por infravermelho, assim como a temperatura do ar e umidade relativa do ar, com menor custo, em relação aos outros aparelhos de temperatura, tornando essa técnica mais acessível. Também se apresenta como uma técnica mais rápida, prática, e não destrutiva (KIRKHAN, 2014), quando comparada à bomba de Scholander.

5 CONCLUSÕES

Foi verificado um ajustamento satisfatório para $(T_c - T_{ar})$ com o DPV. Logo, o cálculo do CWSI por meio do DPV apresenta-se como uma alternativa mais prática e operacional para determinar o estresse hídrico do que pela obtenção de T_w .

A relação entre o $CWSI_{est}$ com o $CWSI_{med}$ obteve desempenho do modelo de estimação classificado como “Muito bom”. Sendo assim, o $CWSI_{est}$ obtido utilizando os dados provenientes de um protótipo a baixo custo, pode ser utilizado como indicador de estresse hídrico para a berinjela.

O $CWSI_{est}$ apresentou valores relativamente mais altos à medida que a umidade do solo diminuiu. Para o potencial hídrico, o $CWSI_{est}$ aumentou à medida que o mesmo diminuiu, concluindo que é possível a utilização do protótipo para detectar o déficit hídrico na berinjela.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALADENOLA, O.; MADRAMOOTOO, C. Response of greenhouse-grown bell pepper (*Capsicum annuum* L.) to variable irrigation. **Canadian Journal of Plant Science**. n.94: p. 303-310, 2014.
- ANDRADE, I. P. S., **Manejo da Irrigação na cultura da Figueira (*Ficus carica* L.) utilizando o balanço de água no solo**. 2013. 54p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2013.
- ANGELOCCI, L.R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico. Balanço hídrico da planta**. Piracicaba: O autor, 2002. 272p.
- BEHMANN, J.; STEINRÜCKEN, J.; PLÜMER, L. Detection of early plant stress responses in hyperspectral images. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. n.93: p. 98-111, 2014.
- BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; SANTOS, A.O. Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n.35, v.8: p. 1531-1540, 2000.
- BUCKS, D. A.; NAKAVAMMA, F. S.; FRENCH, O. F.; REGARD, W. W.; AND ALEXANDER, W. L. 1985. Irrigated guayule evapotranspiration and plant water stress. **Agricultural Water Management**. v.10: p.61-79, 1985.
- CAMARGO, A. P. DE; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1: p.89-97, 1997.
- CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. **Introduction to environmental biophysics**. New York: Springer, 1998. 286p.
- CLARKE, T.R. An empirical approach for detecting crop water stress using multispectral airborne sensors. **Hort Technology**. v.7: p. 9-16, 1997.
- DAVIES, W. J.; ZHANG, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. **Annual review of plant biology**, v. 42, n. 1, p. 55-76, 1991.
- DAYUBE, S. O. de; JESUS, M. L. de; VIANA, S. B. de A. Índice de estresse hídrico na cultura do algodão para fins do manejo de irrigação. **Revista Univap**, v.22, n.40, 2016.
- ERDEM, Y.; ERDEM, T.; ORTA, A.H.; OKURSOY, H. Irrigation scheduling for watermelon on with crop water stress index (CWSI). **Journal of Central European Agriculture**, v. 6: p. 449-460, 2005.
- FALKER, A. A., **Nota de Aplicação – HFM 2010 – N.1**. Disponível em: <http://www.falker.com.br/produto_artigos.php?id=7>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. Towards a water and food secure future: Critical perspectives for policy-makers. **FAO e WWC**, p: 76. 2015.

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

FOLEGATTI, MARCOS VINÍCIUS; OLITTA, ANTONIO F. L. **Avaliação do desempenho de um "scheduler" na detecção do estresse hídrico em cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.) Irrigada com diferentes lâminas**.1988.[s.n.], Piracicaba, 1988.

GARCIA, A.; ANDRE, R.G.B.; FERREIRA, M.I.; PAÇO, T. Comparação de modelos para avaliação do estresse hídrico em cultura de nectarinas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.8, n.1, p.43-48, 2000.

GHAEMI, A.; MOAZED, H.; RAFIEE, M.R.; NASAB, S.B. Determining CWSI to estimate eggplant evapotranspiration and yield under greenhouse and outdoor conditions. **Iran Agricultural Research**, v. 34: p. 49-60, 2015.

GENUNCIO, G.C. **Crescimento e produção do tomateiro em sistema de cultivo a campo, hidropônico e fertirrigado, sob diferentes doses de Nitrogênio e Potássio**. 2009, p. 131, Tese (Doutorado) – UFRRJ, 2009.

HAMBLIN, A. P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. **Advances in Agronomy**, v. 38, n. 95, p. 155, 1985.

HEINEMANN, A. B. Caracterização dos padrões de estresse hídrico para a cultura do arroz (ciclo curto e médio) no estado de Goiás e suas consequências para o melhoramento genético. **Ciência e Agrotecnologia (UFLA)**, v. 34, n. 01, p. 29-36, 2010.

HOFFMAN, G.J., AND R.E. EVANS. 2007. Introduction. p. 1-32. In Hoffman, G.J., et al. (eds.) Design and operation of farm irrigation systems. 2nd ed. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, St. Joseph, Michigan, USA.

IDSO, S. B. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. **Agricultural Meteorology** n.27: p. 59-70, 1982.

IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; PINTER JUNIOR, 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.

IRMAK, S., HAMAN, D. Z., & BASTUG, R. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. **Agronomy Journal**, v. 92: p. 1221-1227. 2000.

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

JACKSON, R.D. Canopy temperature and crop water stress. **Advances in irrigation**, Academic Press, New York. v. 1: p. 43-85, 1982.

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

JONES HG.; AIKMAN D.; MCBURNEY TA. Improvements to infra-red thermometry for irrigation scheduling in humid climates. **Acta Hort**. v.449: p.259–265, 1997.

KATERJI N.; ITIER B.; FERREIRA I. Etude de quelques critères indicateurs de l'état hydrique d'une culture de tomate en région semi-aride. **Agronomie** v.8: p. 425–433, 1988.

KIRKMAN, M.B. **Principles of soil and water plant relations**. San Diego: Academic. Press, 2014. 500 p.

KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. Evolution and agriculture. In: KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. (Eds.). **Water relations of plants and soils**. Academic, 1995. p.377-404.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. Tradução de C.H.B.A. Prado e A.C. Franco. São Carlos: RiMa, 2000. 533p.

LEI, Y.; ZHANG, H., CHEN, F., ZHANG, L. How rural land use management facilitates drought risk adaptation in a changing climate -A case study in arid northern China. **Sci. Total Environ**. v.550:p. 192-199, 2016.

LIBERATO, M.A.R.; GONÇALVES, J.F.C.; CHEVREUIL, L.R.; NINA JUNIOR, A.R.; FERNANDES, A.V.; SANTOS JUNIOR, U.M. Leaf water potential, gas exchange and chlorophyll a fluorescence in acariquara seedlings (*Minuartia guianensis* Aubl.) under water stress and recovery. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.18: p.315-323, 2006.

LÓPEZ, R.L.; RAMIREZ, R.A.; PEÑA, M.A.V.; CRUZ, I.L. COHEN, I.S; GARCIA, A. R. Índice de estrés hídrico del cultivo de tomate de cascara. **Revista Chapingo Serie Horticultura**, v. 15, n. 3: p. 259-267, 2009.

MAES, W. H., e 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, 2012.

MAGGIOTTO, S.R. **Estimativa da evapotranspiração de referência pelo uso da termometria ao infravermelho**. Dissertação (Mestrado) - Piracicaba, SP: Esalq-USP, 1996. 71p.

MARIN, F.R, ANGELOCCI, L.R.; RIGHI, E.Z.; SENTELHAS, P.C. Evapotranspiration and irrigation requirements of a coffee plantation in southern Brasil. **Experimental Agriculture**, v.41: p.187-197, 2005.

MARIN, F.R, ANGELOCCI, L.R. Evapotranspiration and irrigation requirements of a citrus orchard in Southern Brasil. **Agricultural Water Management**, v. 98: p. 1091-1096, 2011.

MARQUELLI, W. A.; BRAGA, M. B.; SILVA, H. R. da.; RIBEIRO, C. S. da C. **Irrigação na cultura da berinjela**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2014. 24p. (Embrapa Hortaliças. Circular Técnica, 135).

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. **Manejo da irrigação em hortaliças**. Brasília: Embrapa-SPI/Embrapa-CNPH, 1996. 72p.

MEDINA, C.L.; MACHADO, E.C.; GOME, M. de A. Condutância estomática, transpiração e fotossíntese em laranjeira “valência” sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v.11, n.1: p.29-34. 1999.

MENDES, R.M.S.; TÁVORA, F.J.A.F.; PINHO, J.L.N.; PITOMBEIRA, J.B. Relações fonte-dreno em feijão-de-corda submetido à deficiência hídrica. **Ciência Agrônômica**, v.38: p.95-103, 2007.

MCGUIRE, M. J., BALICK, L. K., SMITH, J. A., & HUTCHISON, B. A. Modeling directional thermal radiance from a forest canopy. *Remote Sensing of Environment*, v.27: p. 169-186, 1989.

NOGUEIRA, R.J.M.C.; MORAES, J.A.P.V.; BURITY, H.A. Alterações na resistência à difusão de vapor das folhas e relações hídricas em aceroleiras submetidas a déficit hídrico. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**. v.13: p.75-87, 2001.

OLIVEIRA, A.E.S.; SIMEÃO, M.; MOUSINHO, F.E.P.; GOMES, R.L.F. Desenvolvimento do feijão-fava (*Phaseolus lunatus L.*) sob déficit hídrico cultivado em ambiente protegido. **Holos**, Teresina, v. 1: p. 143-151, 2014.

ORTA, A. H.; ERDEM Y.; AND ERDEM T. Crop water stress index for watermelon. **Horticultural Science**. v.98: p.121-130, 2003.

PURQUERO L.F.V.; TIVELLI S.W. **Manejo do ambiente em cultivo protegido**. **Informações Tecnológicas**, Campinas, 2006. In: IAC, 2006 Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/Tecnologias/MANEJO_Cultivo_Protegido/Manejo_Cultivo_protegido.htm> Acesso em: 29/11/17.

QUEIROZ, T. M. de. **Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central**. Tese (Doutorado) Piracicaba, ESALQ/usp, 141p. 2007

RAIGÓN, M. D.; RODRIGUES-BURRUEZO, A.; PROHENS, J. Effects of organic and conventional cultivation methods on composition of eggplant fruits. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.58, p.6833-6840, 2010.

RAZMJOO, K., P. HEYDARIZADEH AND M.R. Sabzalian, Effect of salinity and drought stresses on growth parameters and essential oil content of *Matricaria chamomile*. **Int. J. Agric. Biol.**, v.10, p.451-454, 2008.

RIBEIRO, C.S. da C.; BRUNE, S.; REIFSCHNEIDER, F. J. B., ed. **Cultivo da berinjela (*Solanum melongena L.*)**. Brasília: EMBRAPA-CNPq, 1998. 23p. (Instrução Técnicas da Embrapa Hortaliças, n °15)

RIBOLDI, L. B. **Variação da pressão de turgor de plantas de milho em condições de déficit hídrico**. 2014. 59p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia e Bioquímica de Plantas) Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

RUFINO, C. A.; TAVARES, L. C.; VIEIRA J. F.; DOR, C. S.; VILLELA, F. A.; SOUZA, A. C.; BARROS, A. C. S. A. Desempenho de genótipos de milho submetidos ao déficit hídrico no estágio vegetativo. **Magistra**. v. 24: p. 217- 225, 2012.

SEPASKHAH, A. R.; KASHEFIPOUR, S. M. Relationships between leaf water potential, CWSI, yield and fruit quality of sweet lime under drip irrigation. **Agricultural Water Management**,v. 25: p. 13–21, 1994.

SCHINDLER, U.; DURNER, W.; VON UNOLD, G.; MÜLLER, L.; WIELAND, R. The evaporation method – Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. v.173, p: 563 - 572, 2010.

SCHINDLER, U. Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. **Arch. Acker-Pflanzenbau u. Bodenk.** v.24: p. 1-7, 1980.

SCHOLANDER, P.F.; HAMMEL, H.T.; HEMMINGSEN, E.A.; & BRADSTREET, E.D. Sap pressure in vascular plants. *Science*, v.148: p.339-346,1965.

SILVA, C. J. da. **Necessidade hídrica e produção do tomateiro para processamento industrial, em resposta a manejos e épocas de suspensão da irrigação**. 2017, 157p. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

SOUSA, J. A.; MALUF, W. R.; GOMES, L. A. A. Produtividade e qualidade de frutos de cultivares de polinização aberta e híbridos F1 de berinjela (*Solanum melongena L.*). **Ciência e Agrotecnologia**. v. 21: p. 334-342, 1997.

STOCKLE, C. O.; DUGAS, W. A. Evaluating canopy temperature-based indices for irrigation scheduling. **Irrigation Science**. v. 13: p. 31-37, 1992.

TAGHVAEIAN, S.; CHÁVEZ, J.L.; HANSEN, N.C. Infrared thermometry to estimate crop water stress index and water use of irrigated maize in northeastern Colorado. *Remote Sensing*, Basel, v. 4: p. 3619-3637, 2012.

TAIZ L.; ZEIGER E. **Fisiologia vegetal**. 3ª.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

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

TOBIN, M. F.; LOPEZ, O. R.; KURSAR, T. A. Responses of Tropical Understory Plants to a Severe Drought: Tolerance and Avoidance of Water Stress. **Biotropica**, v. 31, p. 570-578, 1999.

VAN GENUCHTEN, M.TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Society of America Journal*, v.44: p. 892 – 898, 1980.

VIEIRA, A. R. R. **Influência hídrica do solo nos parâmetros vegetativos e produtivos da berinjela (*Solanum melongena L.*)**. 1994. 134p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

VIEIRA, G. H. S.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; DELAZARI, F. T. Morpho-physiological indicators of water stress on sugarcane as a function of irrigation depths. **Bioscience Journal**, v.30: p.65-75, 2014.

WANG, X.; ZHAO, C.; GUO, N.; LI, Y.; JIAN, S.; YU, K., 2015. Determining the canopy water stress for spring wheat using canopy hyperspectral reflectance data in loess plateau semiarid regions. **Spectroscopy Letters**. n. 48: p. 492-498.

WIDMOSER, P. An alternative to define canopy surface temperature bounds. **Agricultural Water Management**. v.97: p.224-230, 2010.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.

ZHANG, H.; HAN, M.; CHAVEZ, J.L.; LAN, Y. Improvement in estimation of soil water deficit by integrating airborne imagery data into a soil water balance model. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**. v. 10, n. 3: p. 37-46, 2017.