

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**LUCAS MALTONI ANDRADE**

**PREDIÇÃO DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS E EVAPOTRANSPIRAÇÃO  
DE REFERÊNCIA EM AMBIENTE PROTEGIDO**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2021**

**LUCAS MALTONI ANDRADE**

**PREDIÇÃO DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS E EVAPOTRANSPIRAÇÃO  
DE REFERÊNCIA EM AMBIENTE PROTEGIDO**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

Orientador: Fernando França da Cunha

Coorientador: Gustavo Henrique da Silva

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2021**

**LUCAS MALTONI ANDRADE**

**PREDIÇÃO DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS E EVAPOTRANSPIRAÇÃO  
DE REFERÊNCIA EM AMBIENTE PROTEGIDO**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências, para obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

APROVADO: 22 de outubro de 2021.

Assentimento:

*Lucas Maltoni Andrade*

---

Lucas Maltoni Andrade  
Autor

*Fernando França da Cunha*

---

Fernando França da Cunha  
Orientador

*À minha família, meus maiores incentivadores,  
Grandes fontes de educação e disciplina.*

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço especialmente aos meus pais Sérgio e Magdala, e ao meu irmão, Breno, que sempre me apoiaram incondicionalmente nos diversos desafios e necessidades durante a minha vida, sendo também exemplos de determinação e luta. Tenho vocês como aqueles que desejo me tornar ao longo de minha jornada. Sem vocês essa conquista não seria possível.

A todos os amigos que de alguma forma fizeram parte dessa jornada. Foram longos anos acompanhados de muitos desafios e dificuldades, mas a presença de tais pessoas fizeram desses períodos momentos de alegria e de grande orgulho. A vocês, minha gratidão. Agradeço em especial à Marcella de Freitas e ao João Nogueira que me acompanharam desde o início, sendo pessoas que além de considerar verdadeiros amigos, os vejo como exemplos a serem seguidos. Os tenho com verdadeiro carinho.

Ao Prof. Dr. Fernando França pela constante orientação, oportunidades dadas, confiança depositada e apoio durante todo o processo de construção desse TCC e de vários outros trabalhos. Tal participação foi vital para minha formação profissional e pessoal, e por isso, sou extremamente grato.

À instituição – UFV, juntamente com a Empresa Júnior, Agrijúnior, ao PET.EAA e aos demais grupos de pesquisa e extensão que tive a feliz chance de participar e que me proporcionaram a oportunidade de possuir um ensino superior rico em conhecimento e experiências, assim como a expansão de meus horizontes.

Aos demais que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação, o meu muito obrigado.

## RESUMO

Ambientes protegidos, ou casas de vegetação, são estruturas que possibilitam cultivos fora de época, proteção contra pragas e condições climáticas adversas, entre outros. Por outro lado, essa mesma estrutura provoca alterações das condições microclimáticas em seu interior. Em consequência disso, o crescimento e o desenvolvimento das plantas cultivadas em seu interior também são modificados, provocando alterações em diferentes aspectos, como exemplo, o consumo hídrico. Dessa forma, objetivou-se com o presente trabalho analisar o comportamento da evapotranspiração como função das demais variáveis climáticas internas à um ambiente protegido, bem como estimar a evapotranspiração e a demais variáveis em função dos elementos meteorológicos do ambiente externo. Para o trabalho, fez-se uso de estações meteorológicas DAVIS (modelo Vantage PRO2, USA) e de um ambiente protegido com laterais delimitadas por tela branca vazada (Clarit), com nível de sombreamento de 14,0%, e cobertura de plástico de polietileno transparente (150  $\mu\text{m}$ ). Foram captados dados horários de temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento no período de 2 a 21 de agosto de 2019. De posse desses dados, calculou-se a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith. Por meio de regressões lineares, os elementos meteorológicos no interior do ambiente protegido foram estimados com dados medidos em condição de céu aberto. Comparando o comportamento do ambiente protegido em detrimento do meio externo, a radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento apresentaram queda de 45,4%, 14,0% e 85,0% respectivamente. Por outro lado, a temperatura do ar apresentou aumento de 3,3% no interior do ambiente protegido. Como resultado da interação dos fatores mencionados, a evapotranspiração de referência diária apresentou queda de 33,3% no interior do ambiente protegido. As equações de regressão para estimativa da temperatura do ar, radiação solar e evapotranspiração de referência obtiveram  $R^2$  acima de 0,90. As variáveis de déficit de pressão de vapor, umidade relativa e velocidade do vento apresentaram  $R^2$  de 0,89, 0,78 e 0,29, respectivamente. Conclui-se que o ambiente protegido altera os dados meteorológicos e os resultados obtidos indicam a possibilidade de estimá-los utilizando elementos meteorológicos medidos em condição de céu aberto.

**Palavras-chave:** Agrometeorologia. Cultivo protegido. Evapotranspiração. Microclima.

## ABSTRACT

Protected environments, or so called greenhouses, are structures that makes possible crops growth out of season, provides protection over plagues, harsh climatic conditions and others. However, this same structure leads to an altered microclimate condition within. As a consequence, the growth and development of the cultivated crops will also be affected, promoting multiple alterations related to the crop, such as water consumption, as an example. Therefore, this study was oriented to analyze the behavior of the evapotranspiration as a result of the meteorological variables inside a greenhouse, along with the prediction of the evapotranspiration and the other variables as a function of the meteorological condition outside the greenhouse. For this work, was used automatic meteorological stations DAVIS (Vantage PRO2 model, USA) and a built greenhouse with it's lateral area delimited by a white and porous net (Clarit), with a shading level of 14,0%, and it's roof covered by a transparent polyethylene plastic (150  $\mu\text{m}$ ). It was captured hourly data regarding air temperature, solar radiation, relative humidity and wind speed during 2 to 21 august, 2019. In sequence, was calculated the reference evapotranspiration, according to the Penman-Monteith method. By linear regressions, the meteorological variables inside the greenhouse were predicted by the external conditions. Comparing both greenhouse and external data behavior, the solar radiation, relative humidity and wind speed presented a reduction of 45,4%, 14,0% and 85,0% respectively. The air temperature, however, presented a rise of 3,3% regarding the greenhouse condition. As an interaction result of all the mentioned variables, the daily reference evapotranspiration presented a reduction of 33,3%. The linear regression equations for air temperature, solar radiation and reference evapotranspiration predictions obtained a  $R^2$  above 0,9. The vapor pressure deficit, relative humidity and wind speed equations however, presented a  $R^2$  of 0,89, 0,78 and 0,29, respectively. It is concluded that the greenhouse in fact promotes an alteration regarding meteorological variables, and following the obtained results, they indicate that is possible to predict them using meteorological data from external conditions.

Keywords: Agrometeorology. Protected cultivation. Evapotranspiration. Microclimate.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>Local do experimento .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2</b>	<b>Descrição do ambiente protegido .....</b>	<b>10</b>
<b>2.3</b>	<b>Obtenção dos dados .....</b>	<b>11</b>
<b>2.4</b>	<b>Análise das informações .....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Comportamento microclimático.....</b>	<b>14</b>
<b>3.2</b>	<b>Evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) .....</b>	<b>16</b>
<b>3.3</b>	<b>Estimativas dos elementos meteorológicos no interior do ambiente protegido ....</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>21</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O cultivo em ambiente protegido permite a produção de diferentes culturas em diferentes épocas e condições climáticas adversas, resultando em maior lucratividade no empreendimento (LI et al., 2018). No interior dos ambientes protegidos, com o cultivo já estabelecido, os elementos climáticos como radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento sofrem alterações quando comparadas ao ambiente externo, cabendo acrescentar que nesses casos a chuva não caracteriza um fator determinante pela barreira física imposta. Por consequência, o metabolismo e o consumo de água das plantas, que remetem ao rendimento e a qualidade do produto final, são alterados (TANNY, 2013).

Compreender o microclima no interior do ambiente protegido e suas características é um fator crítico para mantê-lo em condições de operação otimizadas durante o crescimento das plantas (CHOAB et al., 2019). Como exemplo para radiação solar, de acordo com Hemming (2011), níveis elevados podem resultar em considerável estresse às plantas, fazendo com que fechem seus estômatos, reduzindo a fotossíntese e a produção. Por outro lado, o sombreamento extremo pode também afetar negativamente a produção dada a escassez de luz. Dessa forma, Li et al. (2018) afirmam que é de grande importância a escolha criteriosa do material de cobertura dos ambientes protegidos, visto que a luz difusa, o nível de sombreamento, a temperatura e a umidade do ar são diretamente influenciados. No mesmo trabalho é apresentado que fatores como durabilidade e custo de aquisição e manutenção também devem ser levados em consideração.

No contexto de variadas coberturas de ambientes protegidos, o uso de materiais plásticos na agricultura tem crescido nas últimas décadas devido aos seus benefícios para a produção agrícola (PICUNO, 2014). Dentre suas variações, o polietileno tem sido usado extensivamente como material de cobertura de ambientes protegidos em diferentes regiões, dada sua maleabilidade, fácil instalação e boa relação custo-benefício quando comparado a outros materiais (ALSADON et al., 2016; LI et al., 2018). Por outro lado, seus efeitos no microclima apresentam grande variação quanto a região de cultivo, o tipo de estrutura, entre outros fatores.

Quanto a ventilação nesses ambientes protegidos, sabe-se que, com um fluxo de ar adequado, tanto a temperatura quanto os gases requeridos para o metabolismo das plantas podem ser distribuídos uniformemente (MOGHADDAM, 2020), apesar de que o ambiente interno ainda esteja sujeito a possíveis variações bruscas de temperatura proporcionadas pelo vento com entrada desimpedida. Nesse contexto, Formisano et al. (2020) argumentam que, além das coberturas de ambientes protegidos, também está se tornando cada vez mais comum a

utilização de redes porosas no controle a insetos, sendo normalmente instaladas nas entradas de ar, como portas e outros tipos de aberturas. Tal estratégia possibilita um uso reduzido de inseticidas, agregando valor a comercialização. No entanto, em seu estudo, é sugerido que se façam análises em condições reais dos efeitos dessas redes no microclima do ambiente protegido, particularmente em localidades de climas mais quentes, tendo em vista que a porosidade das redes resulta em um menor fluxo de ar quando comparada a entradas sem redes. Tal fato implica em maior umidade relativa, assim como em um aumento de temperatura, podendo induzir à queda de produção por calor excessivo a depender da cultura e(ou) maior incidência de doenças visto as condições mais favoráveis de umidade.

De acordo com Tanny (2013), o efeito das coberturas costuma se resumir principalmente na redução da radiação, e seus efeitos na temperatura, por exemplo, fazem parte de um processo muito mais complexo, visto que a temperatura interna do ar é o resultado de transferências variadas e simultâneas de energia. Shi e Chen (2012) ressaltam que o controle de temperatura em um ambiente protegido é um fator essencial para a determinação da produtividade da cultura, salientando que tal área de estudo tem se tornado um tópico frequente de pesquisas acadêmicas.

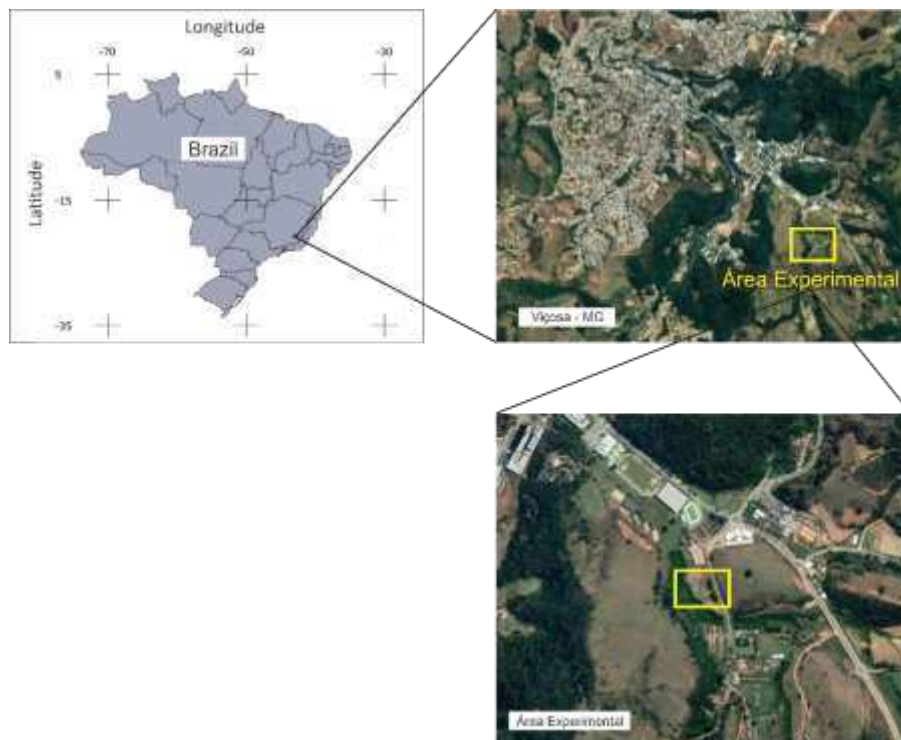
Dessa forma, procurou-se com este estudo analisar o comportamento da evapotranspiração em função dos elementos climáticos no interior de um ambiente protegido em detrimento ao ambiente externo. Com o estudo verifica-se como esses elementos afetam os valores de evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>). Espera-se com os resultados oferecer meios de acompanhamento e controle, por parte do produtor, para manejo das irrigações considerando as condições que seu cultivo está sujeito, possibilitando medidas corretivas e(ou) sistemáticas durante o processo produtivo na busca pela maior produtividade. Objetiva-se também estimar a evapotranspiração e os elementos meteorológicos no interior do ambiente externo por meio de dados coletados na parte externa. Tal estratégia confere a perspectiva de dispensar a obrigatoriedade do emprego de sensores em cada estrutura protegida construída em uma mesma localidade. Assim, mesmo existindo uma estação meteorológica na proximidade, pode ser possível estimar a ET<sub>o</sub> do ambiente protegido por meio de seus dados.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão (UEPE) de Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa (UFV), localizada no município de Viçosa-MG, nas coordenadas de 20°46'09.3"S 42°51'44.7"W e altitude de 674 m, conforme indicado na Figura 1. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é Cwa, ou seja, clima temperado úmido com verão quente e inverno seco (ALVAREZ et al., 2013).

Figura 1 – Esquema do ambiente protegido utilizado no estudo



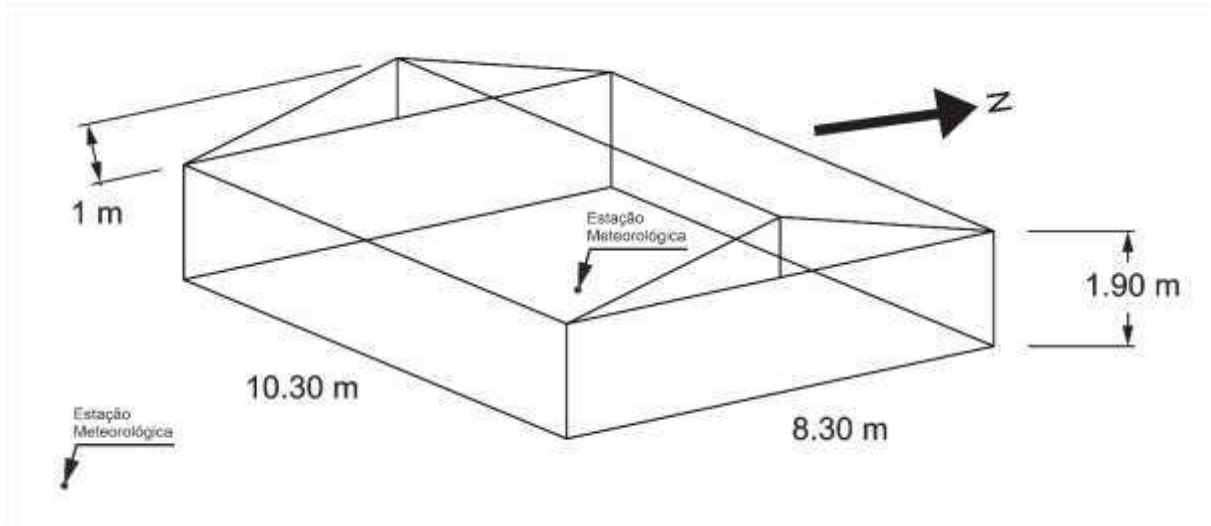
Fonte: Autor.

### 2.2 Descrição do ambiente protegido

Para o experimento, foram empregadas duas estações meteorológicas DAVIS (modelo Vantage PRO2, USA) devidamente instaladas, tanto em local a céu aberto, sujeito às ações da atmosfera, assim como em local fechado, dentro do ambiente protegido. A estrutura (Figura 2), já construída, possui as laterais delimitadas por tela branca vazada (Clarit), com nível de

sombreamento de 14%, e sua cobertura é por meio de plástico de polietileno transparente (150  $\mu\text{m}$ ).

Figura 2 – Esquema do ambiente protegido utilizado no estudo



Fonte: Autor.

### 2.3 Obtenção dos dados

Por meio de sensores instalados nas estações meteorológicas foram obtidas informações horárias de temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa (%), velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e radiação solar ( $\text{W m}^{-2}$ ) durante o período de 02/08/2019 a 21/08/2019, totalizando 450 pares de dados. Os respectivos sensores seguem a padronização de instalação à 2,0 m da superfície do solo. Com base nesses elementos climáticos, foi possível calcular a evapotranspiração de referência ( $ET_0$  em  $\text{mm h}^{-1}$ ) por meio do modelo proposto por Allen et al. (1998) (Equação 1) e déficit de pressão de vapor (hPa) por meio da Equação 2.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

Em que:

$ET_0$  é a evapotranspiração de referência [ $\text{mm d}^{-1}$ ],  $R_n$  é o saldo de radiação na superfície da cultura [ $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ],  $G$  é a densidade de fluxo de calor no solo [ $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ],  $T$  é a temperatura média do ar à 2 metros de altura [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $u_2$  é a velocidade do vento a 2 metros de altura [ $\text{m s}^{-1}$ ],  $e_s$

é pressão do vapor de saturação [kPa],  $e_a$  é pressão de vapor atual [kPa],  $(e_s - e_a)$  é o déficit da pressão de vapor de saturação,  $\Delta$  é a inclinação da curva de pressão de vapor [kPa °C<sup>-1</sup>] e  $\gamma$  é a constante psicrométrica [kPa °C<sup>-1</sup>].

$$D_{Pv} = e_{saturação}(1 - 0,01 \cdot UR\%) \quad (2)$$

Em que:

$D_{Pv}$  é o déficit da pressão de vapor [kPa],  $e_s$  é pressão do vapor de saturação [kPa] e  $UR\%$  é a umidade relativa [%].

A pressão de saturação ( $e_s$ ) foi determinada de acordo com a Equação 3. Esta equação é originalmente de Tetens (1930) e foi adaptada por Murray (1967).

$$e_{saturação} = 6,108 \cdot \exp^{\frac{17,27 \cdot T}{237,3+T}} \quad (3)$$

Sendo: T a temperatura ambiente [°C].

## 2.4 Análise das informações

Os dados de temperatura do ar, umidade relativa, saldo de radiação e velocidade do vento a serem utilizados para o cálculo pelas equações 1, 2 e 3 foram obtidos ao longo de 24 horas, em intervalos horários. Assim, foi possível analisar seu comportamento para o ambiente protegido ao longo de todos os dias em que o experimento foi realizado. Para radiação solar e evapotranspiração, os dados analisados são equivalentes ao período diurno, visto que durante o nictoperíodo ambos os elementos apresentam valores nulos. Logo, se tornou necessário para fins de tratamento dos dados, determinar o intervalo mínimo e máximo do fotoperíodo da localidade para o intervalo de dias analisado de acordo com a Equação 4.

$$T = \frac{2}{15} \cdot \text{Arccos}(-\text{Tan } \phi \cdot \text{Tan } \delta) \quad (4)$$

Em que:

$\phi$  é a latitude da cidade de Viçosa [°], e  $\delta$  a declinação solar da terra [°], determinada pela Equação 5.

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left[ \frac{360}{365} \cdot (284 + n) \right] \quad (5)$$

Em que:

$n$  representa o número de dias decorridos do primeiro dia do ano, até a data do estudo [dias].

Uma vez determinado o fotoperíodo e a devida eliminação dos dados indicados que se encontraram fora de tal intervalo, têm-se que as análises entre os dois conjuntos de dados consistiram em quantificar o efeito “tampão” nos elementos meteorológicos causado pelo ambiente protegido (EC) em detrimento das variáveis externas (EE) e no desenvolvimento de regressões lineares (Equação 6), com as variáveis da EC em função de EE.

$$y = b + ax \quad (6)$$

Em que:

$y$  a variável dependente (EC),  $x$  a variável independente (EE),  $a$  como coeficiente angular e  $b$  como sendo o intercepto no eixo  $y$ .

Dessa forma, com as equações determinadas, foi possível prever as condições microclimáticas dentro do ambiente protegido utilizando apenas dados de estações sujeitas às condições do ambiente, como são normalmente empregadas em campo.

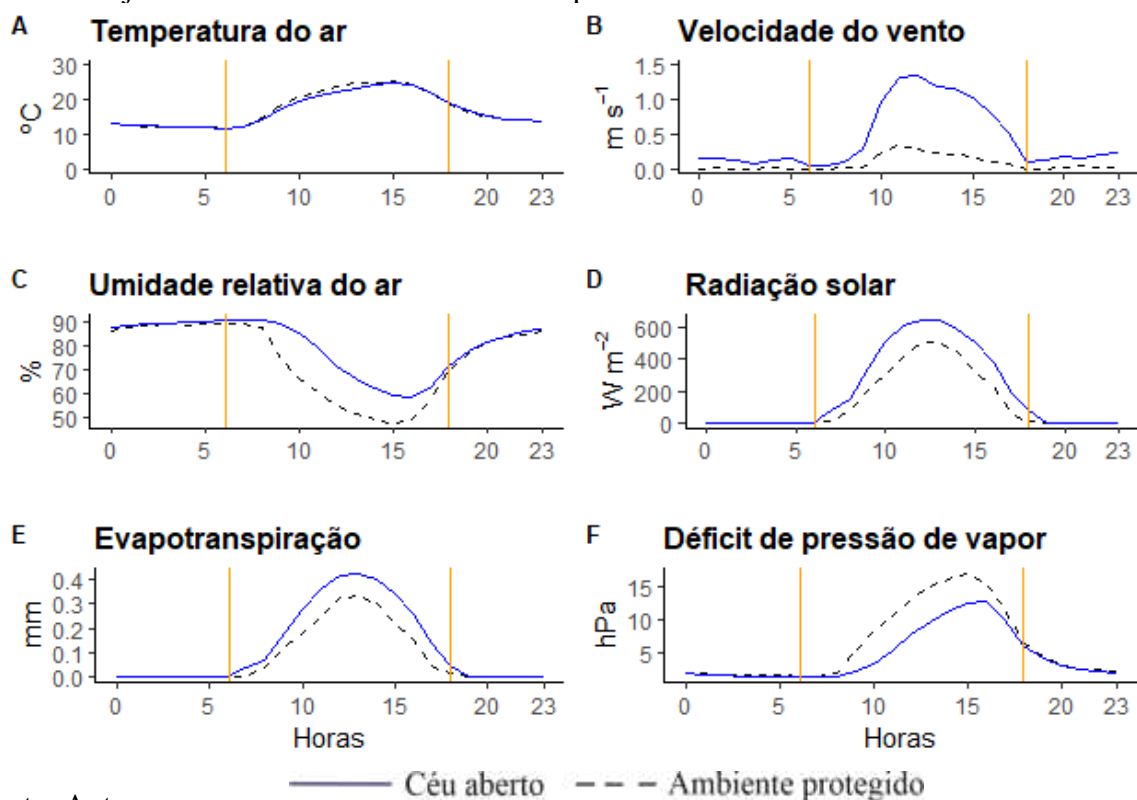
Quanto a validação das regressões obtidas, foi realizado o teste  $t$  de significância para os interceptos e coeficientes. As análises estatísticas e elementos visuais foram geradas no software de livre uso, R Core Team (2016).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Comportamento microclimático

Na Figura 3 é apresentado o comportamento médio dos elementos meteorológicos analisadas ao longo de 24 horas, tanto para as leituras em local de céu aberto, como dentro do ambiente protegido. Com exceção a velocidade do vento (Figura 3B), o ambiente protegido não afetou os valores dos parâmetros avaliados durante o nictoperíodo. Dessa forma, pode-se medir os dados meteorológicos com sensores instalados a céu aberto e utilizá-los para estimar os valores do interior do ambiente protegido.

Figura 3 – Comportamento médio dos elementos meteorológicos ao longo de 24 horas, com barras laranjas indicando o início e fim do fotoperíodo



Verificou-se pela Figura 3D que o ambiente protegido promoveu redução média de 45,40% da radiação solar em relação a condição de céu aberto. Esse efeito é devido a ação atenuante da cobertura de plástico, onde parte da radiação solar é perdida. De toda a radiação solar recebida pela cobertura, parte é refletida, outra parte é absorvida e pode ser transformada em calor sensível ou emitida para o interior do ambiente protegido. O radiômetro no interior do ambiente protegido receberá menor quantidade de radiação direta e maior quantidade de

radiação difusa, que somadas, resultará um valor menor que a radiação solar total recebida pelo sensor externo (radiômetro instalado a céu aberto).

Verificou-se pela Figura 3A que o ambiente protegido promoveu aumento de temperatura do ar em seu microclima de aproximadamente 3,28%. Mesmo recebendo menor quantidade de radiação solar, as laterais e a cobertura do ambiente protegido permitem menor perda de calor sensível. Além disso, no interior do ambiente protegido, menor quantidade de calor sensível é transformada em calor latente de vaporização, corroborando para se ter maior temperatura do ar no interior da estrutura. Comportamento semelhante foi encontrado por Ramos-López et al. (2017) em experimento em ambiente protegido com cobertura de polietileno transparente em Santa Cruz Xoxocotlán, México. Os autores verificaram que a temperatura do ar nos ambientes protegidos apresentou variações superiores de aproximadamente 2 °C quando comparada ao ambiente externo durante o tempo de experimento, compreendido entre outubro de 2013 a fevereiro de 2014.

A velocidade do vento dentro do ambiente protegido (Figura 3B) durante o fotoperíodo foi acentuadamente reduzida, na ordem de 85%, enquanto durante o nictoperíodo, a redução foi de 92%. Apesar da significativa queda, esse parâmetro ainda apresentou valores superiores a zero por conta da permeabilidade da tela lateral.

Quanto ao comportamento dos elementos meteorológicos ao longo do dia, obteve-se a leitura máxima de radiação (Figura 3D) entre 12 e 13 horas, enquanto para a temperatura, esse máximo se deu no período das 15 horas. Tal atraso, equivalente tanto para o ambiente externo quanto ao protegido, tem a sua explicação no balanço de energia da localidade. De acordo com Pereira et al. (2013), a radiação solar inicialmente aquece a superfície do solo, armazenando calor e só depois aquece o ar em contato, causando o transporte convectivo do calor, até o momento em que a estação meteorológica seja capaz de detectar a leitura por meio dos sensores localizados a 2 metros acima do nível do solo.

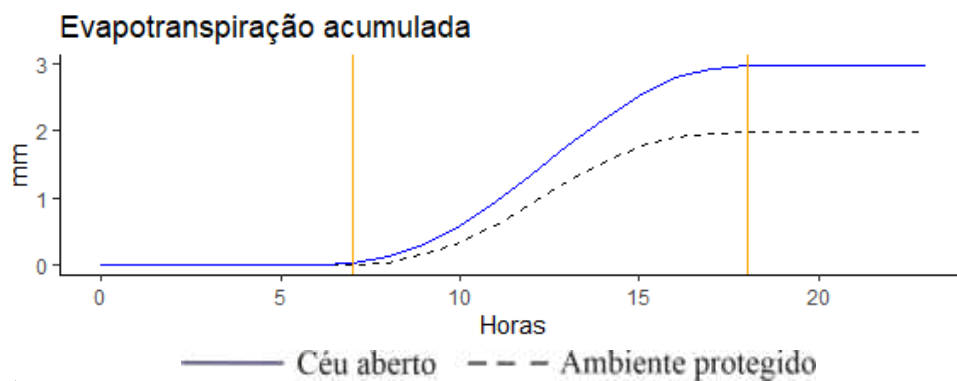
Por outro lado, o ambiente protegido causou quedas mais acentuadas para a umidade relativa do ar (Figura 3C) quando comparada ao ambiente aberto. Para o período de incidência solar, essa diferença consistiu em média no valor de 14%, com as leituras de ambas as estações se aproximando com a redução da intensidade de radiação solar, até o momento que se tornam quase iguais no final do dia. Tendo em vista que a umidade relativa dentro do ambiente protegido apresentou valores menores quando comparados ao ambiente externo, por consequência, o déficit de pressão de vapor para a ambiente protegido foi maior nas horas de elevada demanda atmosférica por vapor d'água.

Era esperada uma maior umidade relativa no interior do ambiente protegido pelo efeito conjunto da água evapotranspirada no meio interno e pela redução da troca de ar com o ambiente e, portanto, de água. Como os resultados foram diferentes daqueles que eram esperados, uma possível justificativa estaria na ineficiência das laterais da casa de vegetação em reter a umidade em seu interior. Além disso, no interior do ambiente protegido estava sendo cultivado morango, em início de ciclo, com solo exposto e baixo coeficiente de cultivo. Assim, a evapotranspiração real no interior do ambiente protegido era menor do que no ambiente externo, onde a estação meteorológica estava instalada em área coberta por grama e sem restrição hídrica. Então, com o ar apresentando menor razão de mistura e maior temperatura, o déficit de pressão (Figura 3F) foi maior no interior do ambiente protegido.

### 3.2 Evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>)

O efeito acumulativo de todos os elementos meteorológicos, levando em conta as alterações microclimáticas causadas por um ambiente protegido, causaram uma redução de 43% na evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) horária durante o fotoperíodo. Para uma melhor análise, acumulou-se as lâminas horárias, com seus valores sendo apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Comportamento médio da evapotranspiração de referência acumulada ao longo de 24 horas, com barras laranjas indicando o início e fim do fotoperíodo



Fonte: Autor.

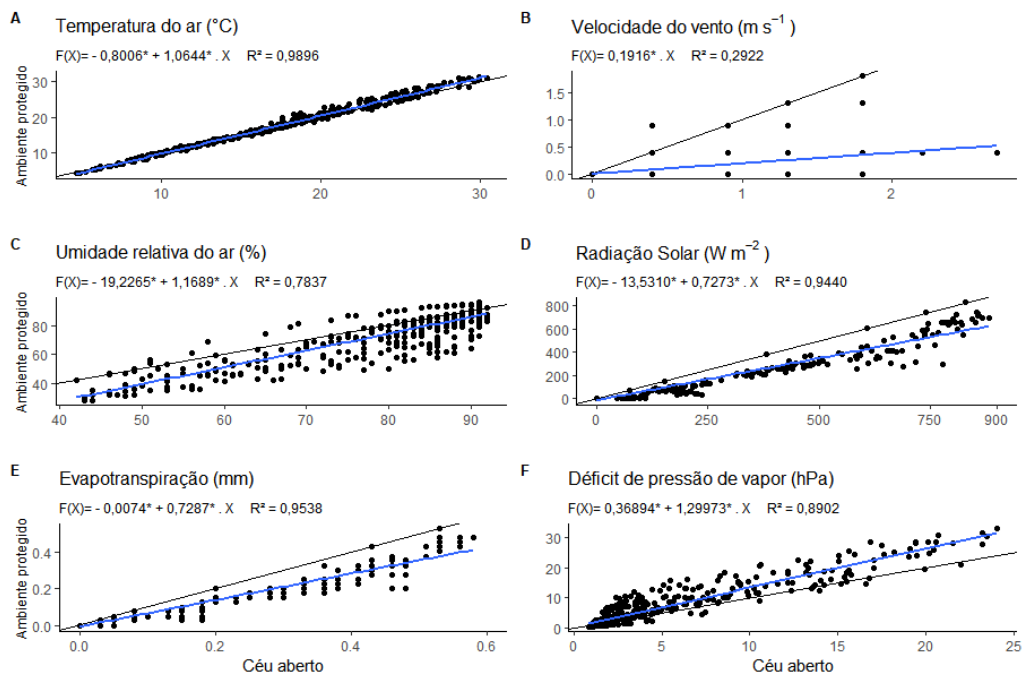
Pode-se observar na Figura 4 que para as condições de céu aberto que, ao fim de 24 h, houve uma ET<sub>o</sub> acumulada média de 2,97 mm d<sup>-1</sup>. Por outro lado, as condições criadas pelo ambiente protegido fizeram com que a ET<sub>o</sub> apresentasse valores médios de 1,98 mm d<sup>-1</sup>, causando uma redução de 33,3% na ET<sub>diária</sub>. Essa redução é atribuída aos menores valores de radiação solar e velocidade do vento observados no interior do ambiente protegido. Os outros

elementos contribuíram para aumentar a ETo, entretanto, a radiação solar é o parâmetro que mais afeta essa variável, tendo participação de 80% em sua estimativa.

### 3.3 Estimativas dos elementos meteorológicos no interior do ambiente protegido

Além da análise do comportamento horário dos elementos meteorológicos, na Figura 5 e Tabela 1 estão apresentadas as dispersões dos dados de ambas as estações meteorológicas, bem como as equações de regressão obtidas, respectivamente. Objetivando estimar parâmetros microclimáticos no interior do ambiente protegido com dados externos, realizou-se regressões lineares tomando os valores a céu aberto (EE) como a variável independente, acompanhadas pelos respectivos coeficientes de determinação.

Figura 5 - Estimativa dos elementos meteorológicos no interior do ambiente protegido em função dos dados medidos a céu aberto



\* indica coeficiente significativo pelo teste *t* de Student ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Autor.

Tabela 1 – Relação das equações de regressão e  $R^2$  para os elementos meteorológicos

Elementos meteorológicos	Equações de regressão	$R^2$
Temperatura do ar	$-0,8006 + 1,0644 \cdot X$	0,9896
Velocidade do vento	$0,1916 \cdot X$	0,2922
Umidade relativa do ar	$-19,2265 + 1,1689 \cdot X$	0,7837
Radiação solar	$-13,5310 + 0,7273 \cdot X$	0,9440
Evapotranspiração	$-0,0074 + 0,7287 \cdot X$	0,9538
Déficit de pressão de vapor	$0,3689 + 1,2997 \cdot X$	0,8902

Fonte: Autor.

Verifica-se pelos gráficos e regressões na Figura 5 e Tabela 1 que é possível estimar os elementos meteorológicos no interior do ambiente protegido por meio de dados medidos em condição de céu aberto. As regressões ajustadas para temperatura do ar (Figura 5A),  $ET_o$  (Figura 5E) e radiação solar (Figura 5D) apresentaram  $R^2$  superiores a 0,9, podendo ser considerado como um bom desempenho em modelar as condições do ambiente protegido, causando um acréscimo na  $ET_{diária}$  acumulada média de 8,6%, passando de 1,98 para 2,15mm dia<sup>-1</sup>. A regressão ajustada para déficit de pressão de vapor (Figura 5F) também merece destaque, uma vez que apresentou  $R^2$  de 0,89.

Por outro lado, as regressões ajustadas para umidade relativa do ar e velocidade do vento apresentaram um  $R^2$  de 0,78 e 0,29 respectivamente. Acredita-se que o motivo para que a velocidade do vento tenha apresentado tal valor se deu pela natureza do ambiente protegido, que possui o topo selado, e as laterais fechadas com telas vazadas, que atenuam consideravelmente as rajadas de vento. O resultado sugere que se utilize os valores médios de velocidade do vento para os diferentes momentos (fotoperíodo e nictoperíodo). Espera-se que esta estratégia proporcione bons resultados para estimativa da  $ET_o$ , uma vez que Allen et al. (1998) recomendam utilizar um valor médio diário ou fixar o valor em  $2 \text{ m s}^{-1}$  em cultivos agrícolas realizados a céu aberto.

Quanto a regressão da umidade relativa do ar, acredita-se que uma das causas para um  $R^2$  reduzido, quando comparado aos outros elementos, está relacionada à natureza das laterais vazadas, que influenciaram a dinâmica de trocas de ar, ao passo que também deve-se levar em conta o sensor responsável pelas leituras, que acordo com informações do fabricante possuem uma precisão nominal de  $\pm 2\%$ . Os testes t realizados confirmam que os modelos tiveram ajustes significativos.

É relevante salientar que a análise acerca do comportamento dos elementos meteorológicos, assim como as regressões aqui apresentadas, foram realizadas em caráter de análise direcionada às condições do experimento, com uma estufa de características construtivas singulares. Dessa maneira, para diferentes entornos, estudos análogos são necessários em ordem de se obter o conhecimento do comportamento microclimático. Mesmo assim, os resultados apresentados indicam a possibilidade de se utilizar elementos meteorológicos medidos a céu aberto para estimar os elementos meteorológicos do interior do ambiente protegido. Assim, economia para obtenção de dados serão alcançadas e os dados poderão ser utilizados em diferentes aplicações, como obtenção da ETo para manejo hídrico de diferentes cultivos agrícolas.

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que o ambiente protegido em questão promoveu alteração na evapotranspiração como consequência do comportamento do microclima em relação ao ambiente aberto, traduzindo em uma atenuação quanto a ação mais rigorosa da velocidade do vento e da radiação solar, além de causar menor umidade relativa do ar e conseqüentemente, maior déficit de pressão de vapor em seu ambiente. Esses efeitos conjuntos resultaram em considerável queda na evapotranspiração de referência diária, apresentando uma lâmina evaporada para a atmosfera menor que os valores observados para o ambiente externo. Tal efeito, para as condições testadas, quando aplicado às escalas de tempo de cultivos agrícolas, de semanas e meses, representa uma economia substancial da lâmina de água a ser aplicada via irrigação, quando empregada.

As equações de regressão linear encontradas podem ser utilizadas para estimar a  $ET_{diária}$  e o microclima estabelecido no ambiente protegido, tendo em vista as significâncias encontradas, as condições experimentais e o pequeno acréscimo na  $ET_{diária}$  acumulada média. Tais equações são particularmente úteis em situações que se tem apenas dados de estações meteorológicas instaladas em campo aberto e deseja-se estimar o microclima criado por ambientes protegidos já existentes ou até mesmo de futuras instalações como guia para atividades de manejo da irrigação, entre outros. Sugere-se para trabalhos futuros o desenvolvimento de modelos para microclimas em ambientes protegidos utilizando de dados provenientes de estações meteorológicas automáticas de livre acesso ao público, uma vez que podem fornecer as informações meteorológicas em campo aberto.

## 5 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome, FAO, 297 p. 1998.
- ALSADON, A.; AL-HELAL, I.; IBRAHIM, A.; ABDEL-GHANY, A.; AL-ZAHARANI, S.; ASHOUR, T. The effects of plastic greenhouse covering on cucumber (*Cucumis sativus* L.) growth. **Ecological Engineering**, v. 87, p. 305-312, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.12.005>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- CHOAB, N.; ALLOUHI, A.; EL MAAKOUL, A.; KOUSKSOU, T.; SAADEDDINE, S.; JAMIL, A. Review on greenhouse microclimate and application: Design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies. **Solar Energy**, v. 191, p. 109-137, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.042>
- FORMISANO, L.; EL-NAKHEL, C.; CORRADO, G.; *et al.* Biochemical, physiological, and productive response of greenhouse vegetables to suboptimal growth environment induced by insect nets. **Biology**, v. 9, n. 12, p. 1–21, 2020. <https://doi.org/10.3390/biology9120432>
- HEMMING, S. Use of natural and artificial light in horticulture - Interaction of plant and technology. **Acta Horticulturae**, v. 907, p. 25–36, 2011. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.907.1>
- LI, G.; TANG, L.; ZHANG, X.; *et al.* Factors affecting greenhouse microclimate and its regulating techniques: A review. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 167, n. 1, p. 0–9, 2018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/167/1/012019>
- MOGHADDAM, J. J. The effect of turbulence on natural ventilation of a proposed octagonal greenhouse in a transient flow. **International Journal of Environmental Science and Technology**, n. 0123456789, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02955-y>
- PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; NOVA, N. A. V. **Evapotranspiração**. Campinas: Fundag, 2013.
- PICUNO, P. Innovative Material and Improved Technical Design for a Sustainable Exploitation of Agricultural Plastic Film. **Polymer - Plastics Technology and Engineering**, v. 53, n. 10, p. 1000–1011, 2014. <https://doi.org/10.1080/03602559.2014.886056>
- R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Available in: <<https://www.R-project.org>> (Accessed on June 10, 2016).
- RAMOS-LÓPEZ, B. I.; MARTÍNEZ-GUTIÉRREZ, Gabino A.; MORALES, I.; *et al.* Consumo de agua y rendimiento de tomate de cáscara bajo diferentes cubiertas de invernaderos.

**Horticultura Brasileira**, v. 35, n. 2, p. 265–270, 2017. <https://doi.org/10.1590/s0102-053620170218>

SHI, Y.; CHEN, M.; LI, M. Comparing of temperature variation with different types greenhouse. **Advanced Materials Research**, v. 594–597, p. 2128–2131, 2012. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.594-597.2128>

TANNY, J. Microclimate and evapotranspiration of crops covered by agricultural screens: A review. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 1, p. 26–43, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.10.008>