



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DÉBORAH CECÍLIA TRIGUEIRO CUSTÓDIO DE BRITO SOUZA**

**ILUMINAÇÃO SUPLEMENTAR LED NO CULTIVO DE PIMENTÃO VERDE**  
**(*Capsicum annuum*) EM ESTUFAS AGRÍCOLAS**

**JUAZEIRO/BA**

**2023**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DÉBORAH CECÍLIA TRIGUEIRO CUSTÓDIO DE BRITO SOUZA**

**ILUMINAÇÃO SUPLEMENTAR LED NO CULTIVO DE PIMENTÃO VERDE**  
**(*Capsicum annuum*) EM ESTUFAS AGRÍCOLAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, Campus Juazeiro, como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Dian Lourençoni

**JUAZEIRO/BA**

**2023**

## FICHA CATALOGRÁFICA

S729i Souza, Déborah Cecília Trigueiro Custódio de Brito  
Iluminação suplementar led no cultivo de pimentão verde (*capsicum  
annuum*) em estufas agrícolas / Déborah Cecília Trigueiro Custódio de Brito  
Souza. – Juazeiro-BA, 2023.  
x, 44 f.: il. 29 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do  
Vale do São Francisco, Campus Juazeiro, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Dian Lourençoni

1. Pimentão - Cultivo. 2. Modelagem *fuzzy*. I. Título. II. Lourençoni, Dian. III.  
Universidade Federal do Vale do São Francisco.

CDD 641.35643

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**


**DÉBORAH CECÍLIA TRIGUEIRO CUSTÓDIO DE BRITO SOUZA**

**ILUMINAÇÃO SUPLEMENTAR LED NO CULTIVO DE PIMENTÃO VERDE  
(*Capsicum annuum*) EM ESTUFAS AGRÍCOLAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, Campus Juazeiro, como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola.

Aprovado em: 15 de setembro de 2023


**Banca examinadora**

Documento assinado digitalmente  
 **DIAN LOURENCONI**  
Data: 20/09/2023 14:43:26-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---


Prof. Dr. Dian Lourençoni (PPGEA/UNIVASF)

(Orientador)

Documento assinado digitalmente  
 **SILVIA HELENA NOGUEIRA TURCO**  
Data: 19/09/2023 18:06:29-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dra. Sílvia Helena Nogueira Turco (PPGEA/UNIVASF)

Documento assinado digitalmente  
 **WILLIAN MINORU OKITA**  
Data: 19/09/2023 22:20:37-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Willian Minoru Okita (FEM/UNICAMP)

Documento assinado digitalmente  
 **EBERSON SILVA**  
Data: 20/09/2023 15:06:19-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Eberson Silva (UEMG)

## AGRADECIMENTOS

A Deus por, em sua infinita graça e misericórdia, ter me feito chegar até aqui.

A papai e mamãe, por todo o esforço que sempre fizeram para que eu pudesse me dedicar aos estudos.

A minha irmã, Belinha, minha parceira de vida e conselheira pessoal. A vida acadêmica é mais fácil tendo você para me escutar, corrigir e inspirar.

Ao meu marido, Matheus, por todo o incentivo, apoio e cuidado de sempre, mas principalmente durante os meses do experimento. Eu não teria conseguido sem você.

Ao meu orientador, professor Dian, que me acompanhou desde o início do mestrado, sempre com muita paciência e dedicação. O senhor foi uma benção na minha vida.

Aos alunos da graduação Jeonan e Luiz Vinícius pelo auxílio na etapa de montagem do experimento.

A Suana por sua amizade, apoio e participação fundamental durante todo o experimento.

A Luana e Ayala, companheiras de turma, por todas as ajudas e incentivos. Poder compartilhar essa jornada com vocês tornou tudo mais fácil.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

ao único que opera grandes maravilhas,  
porque a sua misericórdia dura para sempre;  
Salmo 136.4

## RESUMO

Diante do constante aumento populacional mundial e da crescente demanda por alimentos, a produção agrícola precisará aumentar significativamente para atender às necessidades até 2050, de acordo com a ONU. A agricultura tem um impacto ambiental significativo, ocupando grande parte da superfície terrestre, consumindo muita água doce e contribuindo para as emissões de gases do efeito estufa. Diante disto, a iluminação suplementar surge como uma alternativa para aumentar a produção de alimentos, permitindo que a produção não dependa totalmente das condições climáticas locais. O objetivo é complementar a luz solar quando necessário, garantindo os níveis de iluminação necessários ao desenvolvimento das culturas. As lâmpadas LED têm sido empregadas nos sistemas de iluminação suplementar devido a sua alta eficiência energética e possibilidade do uso de diferentes cores. A presente pesquisa visa investigar o controle de sistemas de iluminação suplementar LED por meio da modelagem fuzzy, além de examinar a resposta das plantas de pimentão ao uso de LEDs com diferentes composições de cores. O pimentão foi escolhido como cultura de estudo devido ao seu valor econômico, ciclo curto e resistência a pragas, sendo uma das principais hortaliças produzidas no Brasil. Para tanto foi desenvolvido um modelo fuzzy com base em dados experimentais do cultivo de mudas de pimentão sob diferentes intensidades de iluminação, com o objetivo de investigar a possibilidade de sistemas de controle inteligente para a iluminação suplementar. O modelo desenvolvido foi capaz de prever com eficiência parâmetros agrônômicos de mudas de pimentão sob diferentes intensidades de luz, o que pode auxiliar na tomada de decisões para um controle eficiente da iluminação suplementar no cultivo desta hortaliça. Posteriormente, a resposta da cultura do pimentão verde à iluminação suplementar com LEDs de diferentes composições de cores foi investigada por meio de um experimento. Concluiu-se que a iluminação com LEDs trouxe benefícios significativos às variáveis fisiológicas da planta – altura da planta, diâmetro do caule e número de folhas – destacando o desempenho da iluminação com LEDs 100% vermelhos que obtiveram os melhores resultados. Entretanto observou-se que para a região de estudo, a iluminação suplementar não resultou em vantagens consideráveis para as variáveis de produtividade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Iluminação suplementar; LED; Modelagem *fuzzy*.

## ABSTRACT

Faced with the constant increase in the world's population and the growing demand for food, agricultural production will need to increase significantly to meet needs by 2050, according to the UN. Agriculture has a significant environmental impact, occupying a large part of the earth's surface, consuming a lot of fresh water and contributing to greenhouse gas emissions. In view of this, supplementary lighting has emerged as an alternative to increase food production, allowing production not to depend entirely on local climatic conditions. The aim is to supplement sunlight when necessary, guaranteeing the levels of illumination required for crop development. LED lamps have been used in supplementary lighting systems due to their high energy efficiency and the possibility of using different colors. This research aims to investigate the control of LED supplementary lighting systems using fuzzy modeling, as well as examining the response of bell pepper plants to the use of LEDs with different color compositions. Peppers were chosen as the study crop due to their economic value, short cycle and resistance to pests, being one of the main vegetables produced in Brazil. To this end, a fuzzy model was developed based on experimental data from the cultivation of bell pepper seedlings under different lighting intensities, with the aim of investigating the possibility of intelligent control systems for supplementary lighting. The model developed was able to efficiently predict agronomic parameters of bell pepper seedlings under different light intensities, which can help in decision-making for efficient control of supplementary lighting in the cultivation of this vegetable. Subsequently, the response of the green bell pepper crop to supplementary lighting with LEDs of different color compositions was investigated by means of an experiment. It was concluded that LED lighting brought significant benefits to the plant's physiological variables - plant height, stem diameter and number of leaves - highlighting the performance of lighting with 100% red LEDs, which obtained the best results. However, it was observed that for the region under study, supplementary lighting did not result in considerable advantages for the productivity variables.

**KEYWORDS:** Supplementary lighting; LED; Fuzzy modeling.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Espectro de luz visível .....	12
<b>Figura 2</b> – Exemplos de funções de pertinência para variáveis térmicas.....	14
<b>Figura 3</b> – Estrutura de um sistema de inferência <i>fuzzy</i> .....	15

### ARTIGO I

<b>Figura 1</b> - Funções de pertinência da variável de entrada (nível de iluminação) .....	25
<b>Figura 2</b> - Funções de pertinência das variáveis de saída, A: altura da planta, B: número de folhas, C: diâmetro do colo, D: número entrenós, E: massa fresca da parte aérea e F: massa fresca da parte radicular.....	26
<b>Figura 3</b> - Gráficos das variáveis de saída. A: altura da muda, B: número de folhas, C: diâmetro, D: número entrenós, E: massa fresca da parte aérea, F: massa fresca da parte radicular.....	28
<b>Figura 4</b> - Diagramas de dispersão para A: altura da muda, B: número de folhas, C: diâmetro, D: número entrenós, E: massa fresca da parte aérea e F: massa fresca da parte radicular.....	30

### ARTIGO II

<b>Figura 1</b> - Esquema de distribuição dos tratamentos e parcelas.....	40
<b>Figura 2</b> - Parcelas separadas com lonas no período noturno (A) e no período diurno (B).....	41
<b>Figura 3</b> - Altura média da planta (cm) durante o período de cultivo.....	44
<b>Figura 4</b> - Gráfico de temperaturas médias e radiação global para a cidade de Juazeiro BA de março a agosto de 2023.....	46

## LISTA DE TABELAS

### ARTIGO I

<b>Tabela 1</b> - Solução nutritiva de Hoagland.....	22
<b>Tabela 2</b> - Dados obtidos ao fim do experimento.....	23
<b>Tabela 3</b> – Conjunto de regras do modelo <i>fuzzy</i> .....	27
<b>Tabela 4</b> - Taxas de erro do modelo: erro médio (ME) ou tendência ou, ainda, BIAS – viés, erro absoluto médio (MAE), erro quadrático médio (MSE), raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), erro percentual absoluto médio (MAPE) e o índice de eficiência de <i>Nash-Sutcliffe</i> (NSE).....	29

### ARTIGO II

<b>Tabela 1</b> - Tratamentos utilizados, suas composições de cores e intensidade de radiação.....	40
<b>Tabela 2</b> - Resultados da variável número de folhas.....	42
<b>Tabela 3</b> - Resultados da variável número de altura da planta.....	43
<b>Tabela 4</b> - Resultados da variável diâmetro do caule.....	45
<b>Tabela 5</b> - Resultados das variáveis de produtividade para cada tratamento.....	45

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO .....	13
2.1 Iluminação suplementar na produção agrícola .....	13
2.2 Iluminação suplementar com LED .....	14
2.3 Controladores <i>fuzzy</i> .....	15
2.4 Sistema de inferência <i>fuzzy</i> .....	17
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	18
ARTIGO I: MODELAGEM <i>FUZZY</i> PARA ANÁLISE DE DIFERENTES INTENSIDADES LUMINOSAS NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE PIMENTÃO .....	21
INTRODUÇÃO .....	23
MATERIAL E MÉTODOS .....	24
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	27
CONCLUSÃO .....	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33
ARTIGO II:ILUMINAÇÃO SUPLEMENTAR LED NO CULTIVO DE PIMENTÃO VERDE ( <i>Capsicum annuum</i> ) EM ESTUFA AGRÍCOLA .....	37
INTRODUÇÃO .....	39
MATERIAL E MÉTODOS .....	41
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	44
CONCLUSÃO .....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	54

## 1. INTRODUÇÃO

Em 2019 a população mundial era de 7,713 bilhões de pessoas. A ONU estima que em 2050 este número cresça para 9,735 bilhões (ONU, 2019). Hoje, mais da metade da população mundial é urbana, e até 2050 espera-se que mais 2,5 bilhões de pessoas estejam morando em áreas urbanas (FAO, 2019). Este crescimento populacional traz desafios para a agricultura mundial. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura, projeções baseadas no crescimento populacional e nos padrões de consumo de alimentos indicam que a produção agrícola precisará aumentar em pelo menos 70% para atender às demandas até 2050 (FAO, 2010).

Ao nos depararmos com este cenário de aumento populacional e conseqüentemente maior demanda por alimentos, se faz necessário analisarmos o impacto ambiental da agricultura. Sabe-se que a agricultura utiliza 40% da superfície terrestre no mundo, é responsável pelo consumo de 60% de água doce e causa entre 17 e 32% das emissões mundiais de gases do efeito estufa (Bellarby, 2008 apud Gould; Caplow, 2012.) Sendo assim, o futuro da agricultura precisa estar comprometido com a eficiência no uso do solo e recursos naturais, bem como com o seu impacto ambiental. Faz-se necessário olhar para a produção do alimento e buscar meios de tornar esse processo mais eficiente, ou seja, modos de produzir mais, mais rápido e com mais qualidade.

A iluminação suplementar surge como alternativa para aumentar a produção de alimentos, de modo que esta não dependa totalmente das condições do tempo local, dando ao produtor um controle parcial das condições de luminosidade.

O objetivo de um sistema de iluminação suplementar é complementar a luz solar, quando esta não estiver suprimindo totalmente as necessidades da cultura, de modo a não “atrasar” a produção devido a períodos nublados. Com a suplementação luminosa, objetiva-se que a cultura sempre receba a iluminação necessária para o seu desenvolvimento, tornando a produção mais eficiente.

Por muitos anos utilizou-se lâmpadas de vapor de sódio ou fluorescentes para suplementar a iluminação em produções agrícolas. Entretanto, com o avanço da tecnologia, surgiram os LEDs (*light-emitting diodes* ou diodos emissores de luz), que são diodos semicondutores capazes de produzir alto fluxo luminoso com baixa emissão de calor, e têm maior vida útil, sendo assim mais eficientes que os outros tipos de lâmpadas (Singh et al., 2015).

As pesquisas sobre agricultura urbana, fazendas verticais e *plant factories* (fábricas de plantas) têm buscado oferecer novas perspectivas para sistemas robustos de produção de

alimentos nas cidades, os quais geralmente focam no desenvolvimento de uma produção de alta densidade em ambientes controlados. (Graamans et al., 2017)

Assim, o uso de sistemas de iluminação suplementar pode ser um aliado na busca por uma produção de alta densidade em ambientes parcialmente controlados, de modo a apenas suplementar as necessidades lumínicas da cultura produzida.

A lógica fuzzy tem sido amplamente utilizada no âmbito agrícola para a modelagem e análise dos mais diversos fenômenos, como os impactos gerados na superfície de frangos de corte por diferentes temperaturas (Bahuti et al., 2018), a produção de alface irrigado com água tratada magneticamente em diferentes taxas de reposição (Matulovic et al., 2021), a perda de peso em função do resfriamento rápido de uvas de mesa em diferentes sacos de filme plástico (Amorim et al., 2022), entre outros.

No contexto da produção de hortaliças em estufas agrícolas, artigos recentes empregam a modelagem fuzzy no desenvolvimento de controladores inteligentes que garantam condições ideais para o cultivo de plantas, regulando variáveis como temperatura, umidade, iluminação artificial e irrigação (Mostakim et al., 2020; Wang et al., 2020; Belkadi et al., 2020).

Weaver et al. (2019) afirma que lâmpadas LED podem ser dimerizadas e facilmente incorporadas em estufas existentes, e como podem ser controladas de maneira precisa e em tempo real, há uma ampla oportunidade para desenvolver estratégias de controle para a iluminação suplementar.

Esta pesquisa busca investigar possibilidades de controle do sistema de iluminação suplementar LED através da modelagem fuzzy, além de entender qual a resposta de hortaliças cultivadas em estufas à suplementação luminosa com LED.

A cultura do pimentão foi escolhida para esse estudo com base em seu alto valor agregado, curta duração do seu ciclo, e resistência a pragas, além de ser uma das dez hortaliças mais produzidas no país (IBGE, 2017). O censo agropecuário do IBGE (2017) aponta que em 2017 foram produzidas 224.286 toneladas de pimentão no Brasil. As cidades de Petrolina-PE e Juazeiro-BA foram responsáveis pela produção de 1.632 toneladas no mesmo período (IBGE, 2017).

Sendo assim, desenvolveu-se um modelo fuzzy com base em dados experimentais do cultivo de mudas de pimentão sob diferentes intensidades de iluminação, com o objetivo de investigar a possibilidade de sistemas de controle inteligente para a iluminação suplementar.

Posteriormente, a resposta da cultura do pimentão verde à iluminação suplementar com LEDs de diferentes composições de cores foi investigada por meio de um experimento.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Iluminação suplementar na produção agrícola

A luz é o principal fator para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Ela se faz necessária durante todo o ciclo de vida destas, desde a germinação até a produção de flores e sementes (Singh et al., 2015). Isto porque a luz é o elemento crítico que impulsiona a fotossíntese e regula a morfologia, fisiologia e o conteúdo fitoquímico das plantas (Spalholz; Perkins-Veazie; Hernández, 2020). A luz natural impulsiona a fotossíntese e controla muitas respostas fisiológicas e de desenvolvimento ao longo do ciclo de vida de uma planta (Bantis et al., 2018).

Neste sentido, a iluminação suplementar em estufas surge como um método para aumentar a quantidade de iluminação recebida pelas plantas a fim de aumentar a produção de mudas e o crescimento destas (Bantis et al., 2018), encurtando assim os ciclos de produção e melhorando os rendimentos das colheitas (Weaver; Van Iersel; Velni, 2019).

Os primeiros estudos acerca do cultivo de plantas sob lâmpadas elétricas foram publicados na década de 1860, e no início do século vinte e um – com o aprimoramento da tecnologia – iniciou-se a aplicação comercial da iluminação suplementar (Gupta e Agarwal, 2017).

A suplementação luminosa no cultivo de plantas é uma solução para a iluminação natural insuficiente em períodos nublados ou de inverno. Além disso, a iluminação artificial pode ser utilizada no período noturno, de modo a estender o fotoperíodo e possivelmente acelerar a produção.

Singh et al. (2015) ressalta que ao utilizar iluminação artificial para suprir as necessidades lumínicas de uma cultura faz-se necessário avaliar três parâmetros: qualidade, quantidade e duração. Estes três parâmetros têm efeitos diferentes no desempenho da planta.

- Quantidade de luz: Refere-se à intensidade de luz e é o fator que mais afeta a fotossíntese;
- Qualidade da luz: Refere-se à distribuição espectral da radiação, ou seja, em qual faixa do espectro de luz se encontra a radiação que está sendo emitida. A figura 1 mostra o espectro de luz visível e o comprimento de onda correspondente a cada cor.

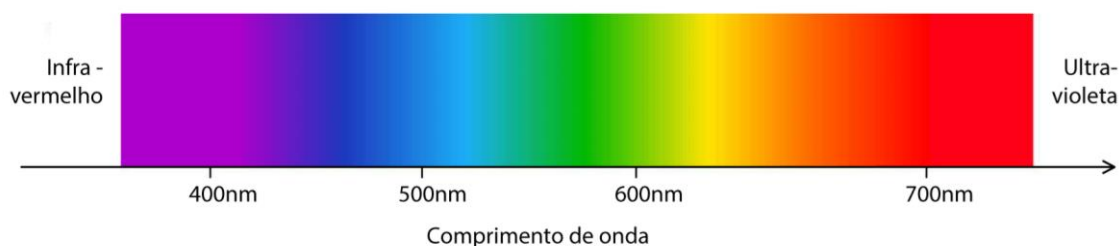


Figura 1: Espectro de luz visível

As plantas usam o comprimento de onda da luz principalmente entre 400 nm (violeta) e 700 nm (vermelho) para conduzir a fotossíntese, que é o intervalo denominado Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR). Este é quase o mesmo intervalo que os humanos percebem como luz visível (que varia de 380 nm a 780 nm) (Sipos et al., 2020).

A distribuição espectral da luz também afeta a forma, o desenvolvimento e a floração da planta. Pesquisas mostram que diferentes composições espectrais podem otimizar o crescimento das plantas, porque permitem controlar melhor o desempenho destas, seu tempo de floração, suas propriedades físicoquímicas, etc (Singh, 2015).

- Duração da luz: Refere-se ao fotoperíodo, ou seja, a quantidade de horas diárias em que a planta recebe luz.

O LED se apresenta como uma alternativa eficiente para a iluminação suplementar pois oferece um controle dos três parâmetros anteriormente citados. Ele é dimerizável, logo sua intensidade pode ser controlada; o LED RGB permite definir a faixa do espectro que será usada; e a este pode ser utilizado para complementar a iluminação natural e assim aumentar o fotoperíodo.

## 2.2 Iluminação suplementar com LED

O avanço da tecnologia das luminárias de diodo emissor de luz (LED) permitiu que pesquisadores e produtores estudassem a fisiologia da luz das plantas e aplicassem esse conhecimento aos sistemas de produção de culturas. (Spalholz; Perkins-Veazie; Hernández, 2020)

Singh et al. (2015) afirma que diferentes combinações espectrais têm sido utilizadas para estudar o efeito da luz no crescimento e desenvolvimento das plantas e com isso, confirma-se

que as plantas apresentam um alto grau de plasticidade fisiológica e morfológica às mudanças na qualidade espectral da iluminação recebida.

Cada faixa do espectro de luz gera efeitos diferentes nas plantas. A luz vermelha (com comprimento de onda na faixa entre 610 e 720 nm) é necessária para o desenvolvimento do aparato fotossintético e fotossíntese, enquanto a luz azul (400-500 nm) é importante para a síntese de clorofila, desenvolvimento de cloroplasto, abertura estomática e fotomorfogênese. (Singh et al., 2015)

Por muito tempo acreditou-se que a luz verde era inútil para a realização da fotossíntese nas plantas, entretanto estudos mostram que a faixa verde do espectro de luz penetra nas folhas mais profundamente que a luz vermelha ou azul, promovendo de maneira mais efetiva a fotossíntese. (Claypool; Lieth, 2020)

Pesquisas recentes mostram que mudas de pimentão cultivadas sob a combinação de luzes vermelhas+verdes e vermelhas+verdes+azuis tiveram peso fresco, área foliar e altura significativamente maiores em comparação com mudas cultivadas sob luzes vermelhas+azuis, que é tipicamente o espectro de muitas “luzes de cultivo” de LED. (Claypool; Lieth, 2020).

### 2.3 Controladores *fuzzy*

A modelagem e o controle fuzzy são técnicas para se manusear informações qualitativas de uma maneira rigorosa (Gomide e Gudwin, 1994). Ela tem como característica principal aplicar métodos que se aproximam da linguagem natural do homem (Godinho et al., 2022).

Em 1965 o professor Loftí A. Zadeh, da Universidade de Berkeley nos EUA, desenvolveu uma teoria que se propunha ser mais flexível que a teoria usual de conjuntos. A teoria criada por ele – chamada de Teoria dos Conjuntos Fuzzy – baseava-se em graus de pertinência (verdade) dos elementos, e visava interpretar fenômenos do dia a dia, que muitas vezes são não quantitativos e vagos.

Na teoria clássica dos conjuntos um elemento pode ou pertencer a um conjunto ou não. Supondo um universo  $U$  e um elemento  $x \in U$ , seu grau de pertinência  $\mu_A(x)$  com respeito a um conjunto  $A \subseteq U$  será dado por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases}$$

O professor Zadeh, em sua teoria de conjuntos fuzzy, propôs que alguns elementos são mais membros de um conjunto que outros, podendo seu grau de pertinência assumir qualquer



valor entre 0 e 1. Assim, um conjunto fuzzy  $A$  em um universo  $U$  é definido por uma função de pertinência  $\mu_A$  que assume valores em um intervalo  $[0,1]$ :

$$\mu_A : U \rightarrow [0,1]$$

A função de pertinência pode ter diferentes formas a depender da variável que representa. Na lógica fuzzy esta variável é linguística, ou seja, ela tem por característica assumir valores dentro de um conjunto de termos linguísticos – palavras ou frases (Gomide e Gudwin, 1994).

Um exemplo muito comum disto é o da temperatura. No gráfico abaixo (Figura 2) temos as funções de pertinência das variáveis térmicas: frio, conforto, relativamente quente e quente.

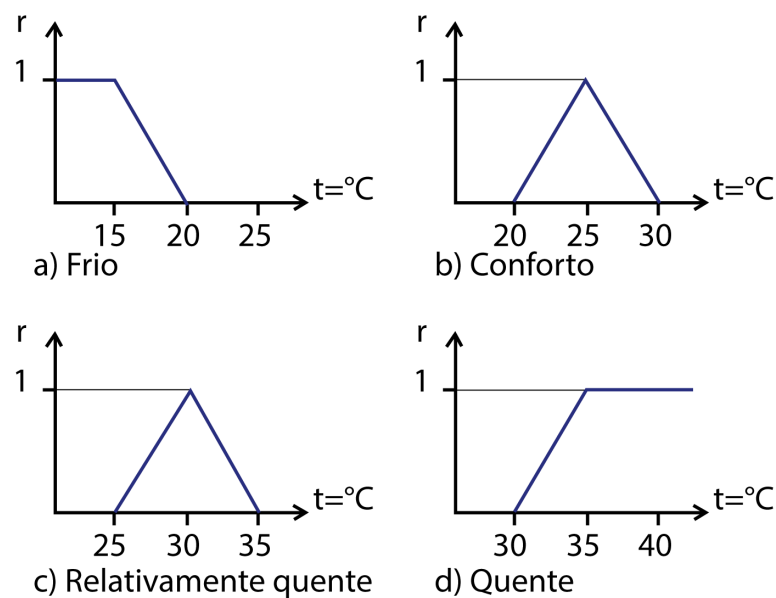


Figura 2: Exemplos de funções de pertinência para variáveis térmicas (Adaptado de Aguado e Cantanhede, 2010)

## 2.4 Sistema de inferência *fuzzy*

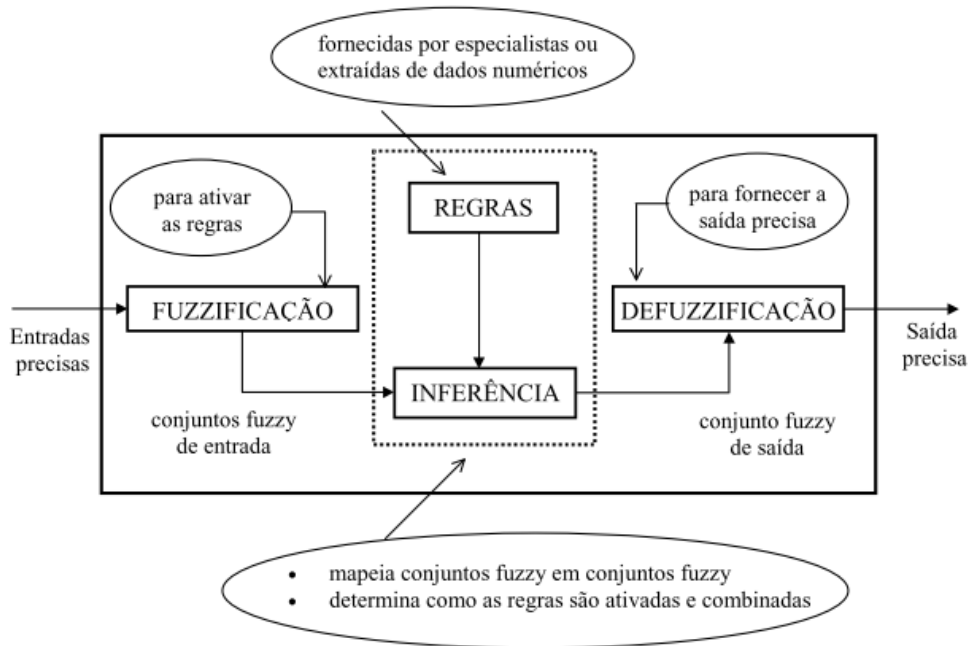


Figura 3: Estrutura de um sistema de inferência *fuzzy* (Gomide e Gudwin, 1994).

Na maioria das situações, existe um conjunto de dados precisos resultante de medições ou observações. Esses dados precisam passar pelo processo de *fuzzyficação*, ou seja, transformá-los em conjuntos *fuzzy*. Isto acontece quando são atribuídas variáveis linguísticas às variáveis numéricas disponíveis. Em um exemplo de temperatura, os dados seriam transformados em variáveis como quente, frio, muito frio, etc.

No processo de inferência, as regras são determinadas por um especialista em forma de sentenças linguísticas do tipo *se... então*. Por fim, na *defuzzyficação*, é feita a interpretação do conjunto de regras de modo a determinar valores numéricos. Assim, as variáveis linguísticas geram valores numéricos.

Controladores fuzzy são aqueles que utilizam um sistema de inferência fuzzy para o seu funcionamento. Dessa forma, é possível controlar as ações a partir de conhecimento especialista ao invés de, necessariamente, modelar o processo em si (Gomide e Gudwin, 1994).

### 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUADO AG, CANTANHEDE MA (2010) Lógica Fuzzy. Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas.

AMORIM MN, MIRANDA IB, SANTOS IEA, LOURENÇONI D, TURCO SHN (2022) Fuzzy modeling for rapid cooling of table grapes in different plastic film bags. *Engenharia Agrícola* 42(1): e20200149. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42n1e20200149/2022>.

BAHUTI M, ABREU LHP, YANAGI JUNIOR T, LIMA RR, CAMPOS AT (2018) Performance of fuzzy inference systems to predict the surface temperature of broiler chickens. *Engenharia Agrícola*, 38(6):813–823. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n6p813-823/2018>

BANTIS F, SMIRNAKOU S, OUZOUNIS T, KOUKOUNARAS A, NTAGKAS N, RADOGLU K (2018) Current status and recent achievements in the field of horticulture with the use of light-emitting diodes (LEDs). *Scientia Horticulturae* 235:437–451.

BELKADI A, MEZGHANI D, MAMI A (2020) Design and implementation of FLC applied to a smart greenhouse. *Engenharia Agrícola* 40(6): 777-790. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n6p777-790/2020>.

CLAYPOOL NB, LIETH JH (2020) Physiological responses of pepper seedlings to various ratios of blue, green, and red light using LED lamps. *Scientia Horticulturae* 268:109371.

FAO (2010) “Climate-Smart” Agriculture: policies, practices and financing for food security, adaptation and mitigation. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i1881e/i1881e00.htm>. Acesso em: 28 dez. 2020.

FAO (2019) FAO Framework for the Urban Food Agenda. Disponível em: <http://www.fao.org/publications/card/en/c/CA3151EN/>. Acesso em: 29 dez. 2020.

GODINHO EZ, GASPAROTTO HV, CANAPPELE FL (2022) Lógica fuzzy na agricultura: breve histórico. *Brazilian Journal of Education, Technology and Society* 15(1):126-139.

GOMIDE F, GUDWIN R (1994) Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy. *SBA Controle & Automação* 4(3):97–115.

GOULD D, CAPLOW T (2012) Building-integrated agriculture: A new approach to food production. *Metropolitan Sustainability: Understanding and Improving the Urban Environment* 147–170.

GRAAMANS L, DOBBELSTEEN AVD, MEINEN E, STANGHELLINI C (2017) Plant factories: crop transpiration and energy balance. *Agricultural Systems* 153:138–147.

GUPTA SD, AGARWAL A (2017) Artificial lighting system for plant growth and development: chronological advancement, working principles, and comparative assessment. In: *Light Emitting Diodes for Agriculture: Smart Lighting*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., p 1–24.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2017) Censo agropecuário. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017/resultados-definitivos>

MATULOVIC M, PUTTI FF, CREMASCO CP, GABRIEL FILHO LRA (2021) Technology 4.0 with 0.0 costs: fuzzy model of lettuce productivity with magnetized water. *Acta Scientiarum Agronomy* 43 (1):e51384. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v43i1.51384>

MOSTAKIM N, MAHMUD S, JEWEL KH (2020) A simulation based study of a greenhouse system with intelligent fuzzy logic. *International Journal of Fuzzy Logic Systems* 10(1):19-37.

ONU (2019) World Population Prospects 2019: Highlights. Disponível em: [https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019\\_Highlights.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf). Acesso em: 28 dez. 2020.

SINGH D, BASU C, MEINHARDT-WOLLWEBER M, ROTH B (2015) LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49:139–147.

SIPOS L, BOROS IF, CSAMBALIK L, SZÉKELY G, JUNG A, BALÁZS L (2020) Horticultural lighting system optimalization: A review. *Scientia Horticulturae* 273.

SPALHOLZ H, PERKINS-VEAZIE P, HERNÁNDEZ R (2020) Impact of sun-simulated white light and varied blue:red spectrums on the growth, morphology, development, and phytochemical content of green- and red-leaf lettuce at different growth stages. *Scientia Horticulturae* 264:109195.

WANG L, WANG B, ZHU S (2020) Multi—model adaptative fuzzy control system based on switch mechanism in a greenhouse. *Applied Engineering in Agriculture*, 36(4), 549-556.

WEAVER GM, VAN IERSEL MW, VELNI JM (2019) A photochemistry-based method for optimising greenhouse supplemental light intensity. *Biosystems Engineering* 182:123–137.

# ARTIGO I: MODELAGEM *FUZZY* PARA ANÁLISE DE DIFERENTES INTENSIDADES LUMINOSAS NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE PIMENTÃO

## RESUMO

O pimentão é uma das hortaliças mais cultivadas e consumidas no Brasil, e o sucesso da sua produção depende em grande parte da utilização de mudas de qualidade. A iluminação suplementar através de LEDs pode auxiliar na produção de mudas, melhorando a qualidade destas. Objetivou-se com o presente trabalho, desenvolver um modelo fuzzy capaz de prever parâmetros agronômicos de mudas de pimentão sob diferentes intensidades de luz. Foram utilizados dados experimentais de níveis de iluminação e resposta biométricas de mudas de pimentão para desenvolver um modelo fuzzy, tendo como variável de entrada os níveis de iluminação, definidos em cinco conjuntos. O modelo prevê as variáveis de saída altura da muda, número de folhas, diâmetro do colo, número entrenó, massa fresca da parte aérea e massa fresca da parte radicular. A análise dos resultados permitiu concluir que a utilização de iluminação suplementar com nível de  $75 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  foi a mais benéfica, produzindo mudas com mais folhas, maior diâmetro do colo, número entrenó e massa fresca. A avaliação das taxas de erro do modelo mostrou resultados satisfatórios para os valores previstos em todas as variáveis, mostrando a utilidade do modelo fuzzy para estimar os melhores níveis de iluminação no cultivo de mudas de pimentão.

**PALAVRAS CHAVE:** Iluminação suplementar; LED; Modelagem *fuzzy*.

## ABSTRACT

Bell peppers are one of the most cultivated and consumed vegetables in Brazil, and their high production yield largely depends on the use of high-quality seedlings. Supplementary lighting using light-emitting diodes (LEDs) can help in the production of seedlings and improve their quality. This study aims to develop a fuzzy model to predict the agronomic parameters of bell pepper seedlings under different light intensities. Experimental data on the lighting levels and biometric responses of bell pepper seedlings were used to develop a fuzzy model, and the lighting levels defined in five sets were used as the input variable. The model was used to predict the output variables, namely the plant height, number of leaves, stem diameter, internode number, shoot fresh weight, and root fresh weight. The results indicated that the use of supplemental lighting at a level of  $75 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  was the most beneficial, producing seedlings with more leaves, higher stem diameters, internode numbers, and fresh weights. The model error rates were satisfactory for the predicted values of all variables, demonstrating the usefulness of the fuzzy model for estimating the best lighting levels in the cultivation of bell pepper seedlings.

**KEY WORDS:** Supplemental lighting; LED; Fuzzy model.

Artigo redigido conforme normas da Revista de Engenharia Agrícola

## INTRODUÇÃO

O pimentão é uma das hortaliças mais cultivadas e consumidas no Brasil, sendo um dos maiores produtores mundiais (Santos et al., 2020). Para o sucesso na produção de hortaliças, é fundamental a utilização de mudas de qualidade para aumentar a produtividade (Bezerra, 2003).

A utilização de iluminação suplementar através de LEDs na produção de plantas vem sendo estudada em diferentes espécies, como tomate (Paucek et al., 2020), morango (Díaz-Galián et al., 2021), batata doce (Rahman et al., 2021) e espécies ornamentais (Koksal et al., 2015). Na produção de pimentão, estudos apontam que a iluminação suplementar com LEDs pode aumentar o número de frutos (Joshi et al., 2019), e diferentes composições do espectro de luz produzem diferentes resultados (Claypool e Lieth, 2020).

Neste tipo de situação, que envolve a tomada de decisões em ambientes complexos e incertos, como no contexto agroalimentar, a teoria dos conjuntos *fuzzy* se apresenta como alternativa promissora para o auxílio na resolução destes problemas (Tomasiello e Alijani, 2021). No contexto agrícola modelos *fuzzy* têm sido utilizados largamente nas mais diversas áreas, como na avaliação dos efeitos de diferentes lâminas de irrigação (Filho et al., 2022), efeitos da salinidade no rendimento de culturas irrigadas (Putti et al., 2022), assim como no desenvolvimento de modelos da temperatura ocular de bovinos em condições de estresse térmico (Lins et al., 2021 b), e modelos das temperaturas do globo ocular e da crista de galinhas poedeiras (Lins et al., 2021 a).

No caso da iluminação suplementar no cultivo protegido de hortaliças, o uso de modelos *fuzzy* pode ser útil para identificar intensidades mais interessantes para o crescimento das culturas cultivadas além de propiciar o desenvolvimento de controles inteligentes.

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho, desenvolver um modelo *fuzzy* capaz de prever parâmetros agrônômicos de mudas de pimentão sob diferentes intensidades de luz.



## MATERIAL E MÉTODOS

### Descrição do experimento e dados utilizados

Neste trabalho foram utilizados os dados de um experimento realizado por Rocha et al. (2014) no campo experimental da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - URI Campus Erechim, Rio Grande do Sul, no período de 28 de janeiro a 05 de março de 2014.

Segundo Rocha et al. (2014), as sementes foram semeadas em copo de plástico com capacidade de 120ml. Foram plantadas duas sementes por copo, na profundidade de 0,5cm, no substrato comercial Plantmax acrescido de vermiculita na proporção de 2:1. Foi realizada irrigação manual diariamente de acordo com a necessidade da planta. Uma vez por semana a água da irrigação foi substituída pela solução de Hoagland (Hoagland e Arnon, 1950) (Tabela 1). 10 dias após a semeadura foi realizado o desbaste, deixando uma planta por copo, com três centímetros de altura.

Tabela 1. Solução nutritiva de Hoagland.

Elemento	Concentração (mg/L de solução nutritiva)	Elemento	Concentração (mg/L de solução nutritiva)
N	210,1	Cu	0,02
P	31,0	Cl	0,64
K	234,6	Fe	5,0
Ca	200,4	Mn	0,5
Mg	48,6	Mo	0,01
S	64,2	Zn	0,05
B	0,5		

Foram testados cinco tratamentos, que consistiam em diferentes níveis de iluminação utilizados no desenvolvimento das mudas: 0 (controle), 25, 50, 75 e 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . A iluminação foi fornecida por lâmpadas LED compostas por LEDs azuis e vermelhos (20% azul e 80% vermelho). O fotoperíodo foi de 16 horas de luz e 8 horas de escuro e a temperatura média do ambiente foi de 28°C.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com 20 repetições por tratamento, com a unidade experimental sendo composta por um pote com uma planta.

As mudas foram cultivadas por 36 dias após a semeadura, e ao fim do experimento foram avaliadas as seguintes variáveis: altura da muda (mm), número de folhas, diâmetro do colo (mm), número entrenó, massa fresca da parte aérea (g) e massa fresca da parte radicular (g). A altura da muda foi medida com o auxílio de uma régua, e o diâmetro do colo com um paquímetro digital. A massa fresca da parte aérea e radicular foi determinada após as mudas serem retiradas dos recipientes, lavadas, secas com papel toalha, e as raízes foram separadas da parte aérea.

Foi feita a análise de variância dos dados obtidos, e comparou-se as médias pelo teste de Duncan. Os dados da variável número de folhas foram transformados em raiz quadrada de  $(x+0,5)$ . Foram adotados 5% de probabilidade para as análises estatísticas. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Duncan (Tabela 2).

Tabela 2. Dados obtidos ao fim do experimento.

Variáveis	Intensidade luminosa ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-2}$ )				
	0	25	50	75	100
Altura da muda (mm)	161 a	144 ab	126 b	146 ab	86 c
Número de folhas	7,5 b	7,0 b	6,8 b	8,8 a	6,6 b
Diâmetro do colo (mm)	3,5 b	3,6 ab	3,3 b	4,0 a	3,4 b
Número entrenó	3,3 b	3,1 b	3,5 b	4,5 a	3,3 b
Massa fresca da parte aérea (g)	3,4 ab	3,2 b	3,2 b	4,1 a	2,0 c
Massa fresca da parte radicular (g)	1,6 c	2,2 bc	3,4 ab	4,0 a	2,1 c

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Duncan.

### Modelagem *fuzzy*

A partir dos dados obtidos no experimento realizado por Rocha et al. (2014), realizou-se a modelagem *fuzzy* para entender os efeitos de diferentes níveis de iluminação suplementar no desenvolvimento das mudas de pimentão. Toda modelagem foi desenvolvida com auxílio da plataforma MATLAB® Fuzzy Toolbox®. Foi utilizado o método de inferência de Mandani (Mandani, 1976), utilizado por diversos autores (Lin et al., 2013; Bedoya et al., 2015; Schiassi et al., 2015), em que se define conectivos lógicos para estabelecer a base de regras.

As regras foram definidas em forma de sentenças linguísticas com base nos dados coletados experimentalmente e com auxílio de quatro especialistas com experiência em modelagem fuzzy e produção agrícola. Para a escolha dos especialistas, foi utilizada a metodologia proposta por Cornelissen et al. (2002), conforme empregado por Yanagi Junior et al. (2012) e Lourençoni et al. (2019).

Com base nas variáveis de entrada e se utilizando como referência os dados experimentais, o modelo fuzzy irá prever as variáveis de saída, altura da muda (mm), número de folhas, diâmetro do colo (mm), número entrenó, massa fresca da parte aérea (g) e massa fresca da parte radicular (g).

Os valores observados (O) e previstos (P), para cada uma das variáveis, foram comparados graficamente em diagramas de dispersão. Em cada diagrama de dispersão foi apresentada a reta  $O = P$ , representando a previsão ideal. Também foi apresentada uma reta determinada por um ajuste linear entre O e P, juntamente com o intercepto e o coeficiente angular, com único objetivo de observar o comportamento geral das previsões e os seus desvios em relação à previsão ideal ( $O = P$ ).

Através dos modelos *fuzzy* desenvolvidos foram simuladas a altura da muda (mm), número de folhas, diâmetro do colo (mm), número entrenó, massa fresca da parte aérea (g) e massa fresca da parte radicular (g), cujo resultados foram validados com os dados coletados experimentalmente através da taxa de erro: erro médio (ME) ou tendência ou, ainda, BIAS – viés, também chamado de erro sistemático (equação 1), erro absoluto médio (MAE) (equação 2), erro quadrático médio (MSE) (equação 3), raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) (equação 4), erro percentual absoluto médio (MAPE) (equação 5) e o índice de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (Nash e Sutcliffe, 1970) (equação 6), calculados pelas seguintes equações:

$$ME = Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (2)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (4)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \cdot 100 \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (6)$$

Sendo  $P_i$  a  $i$ -ésima valores preditos (%),  $O_i$  a  $i$ -ésima valores observados (%);  $n$  o número total de amostras e  $\bar{O}$  a média do observado (%).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo fuzzy desenvolvido que melhor se adequou aos dados teve como variável de entrada, os dados de níveis de iluminação aplicados no experimento, representada por curvas de pertinência triangulares (Figura 1), curvas estas escolhidas por reproduzirem melhor o conjunto de dados (Schiassi et al., 2015; Lourençoni et al., 2019).

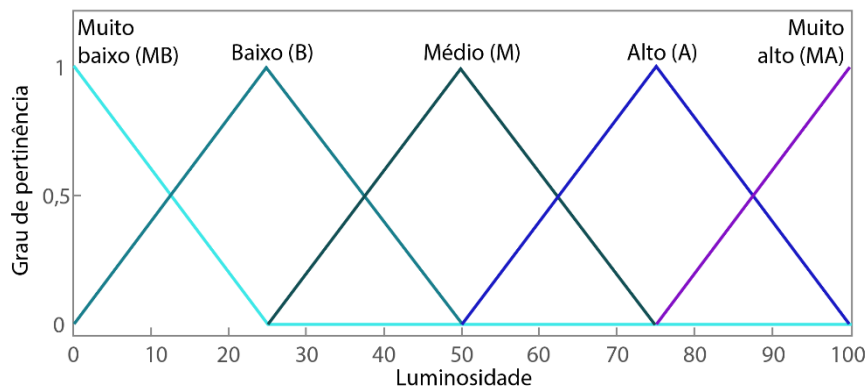


Figura 1. Funções de pertinência da variável de entrada (nível de iluminação)

Com base nas variáveis de entrada, o modelo prevê as variáveis de saída: altura da muda (mm), número de folhas, diâmetro do colo (mm), número entrenó, massa fresca da parte aérea (g) e massa fresca da parte radicular (g) (Figura 2). Todas as variáveis de saída foram representadas por curvas de pertinência triangular, tendo seu delimitador médio definido como o valor encontrado no experimento.

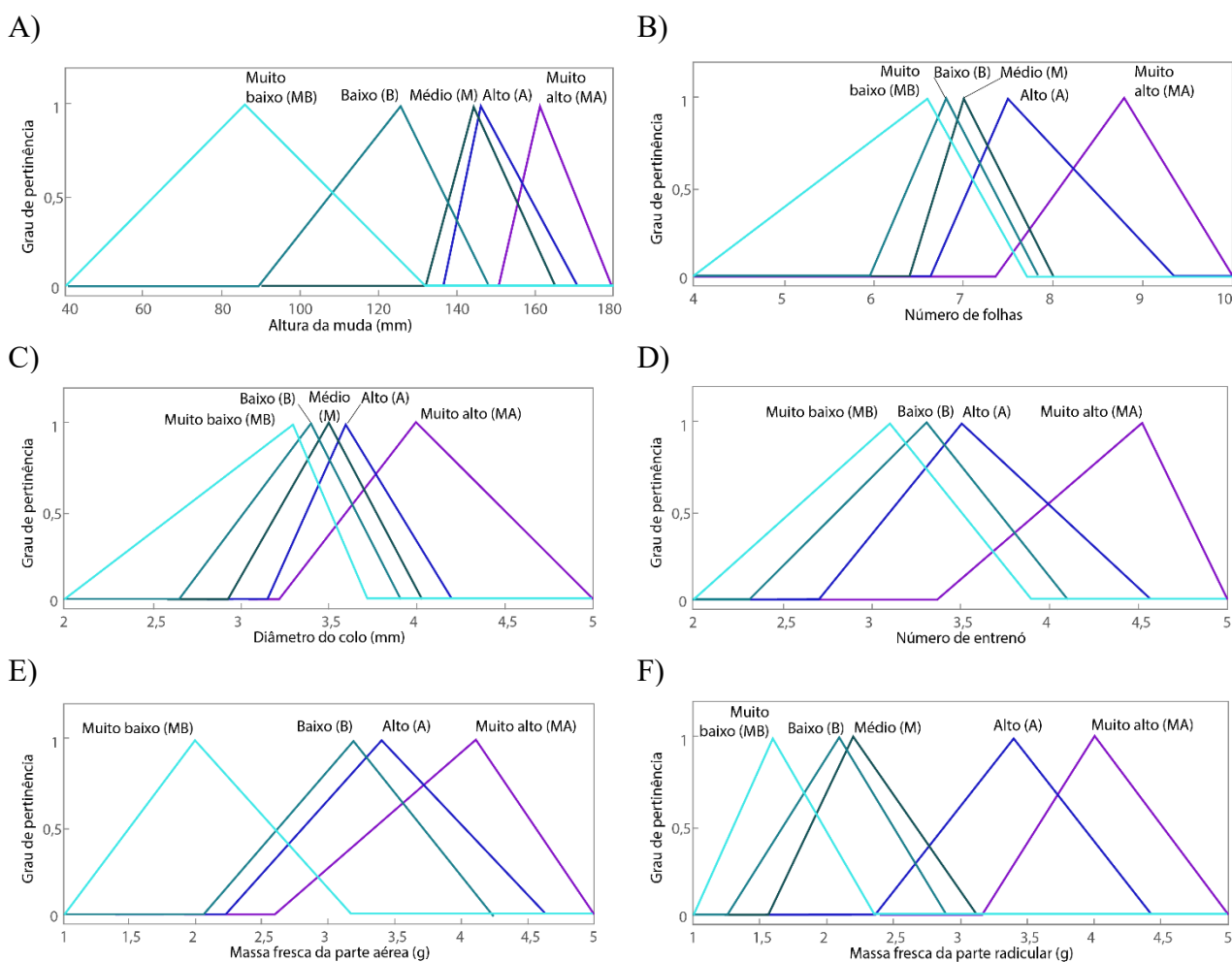


Figura 2. Funções de pertinência das variáveis de saída, A: altura da planta, B: número de folhas, C: diâmetro do colo, D: número entrenó, E: massa fresca da parte aérea e F: massa fresca da parte radicular.

De acordo com as combinações das variáveis de entrada com as variáveis de saída obtidas no experimento, e o auxílio de quatro especialistas com experiência em modelagem *fuzzy* e produção agrícola (Cornelissen et al., 2002), foram definidas 5 regras (Tabela 3) e adotado fator de ponderação igual a 1 para todas as regras pelo fato de todas terem a mesma importância na determinação das respostas do modelo.

Tabela 3. Conjunto de regras do modelo *fuzzy*.

Regra	Variável de entrada	Variáveis de saída					
	Nível de iluminação suplementar	Altura da muda	Número de folhas	Diâmetro do colo	Número entrenó	Massa fresca da parte aérea	Massa fresca da parte radicular
1	Muito baixo	Muito alto	Alto	Médio	Baixo	Alto	Muito baixo
2	Baixo	Médio	Médio	Alto	Muito baixo	Baixo	Médio
3	Médio	Baixo	Baixo	Muito baixo	Alto	Baixo	Alto
4	Alto	Alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto
5	Muito alto	Muito baixo	Muito baixo	Baixo	Baixo	Muito baixo	Baixo

A defuzzificação foi realizada usando o método do centro de gravidade (Centroide ou Centro de Área), o qual considera todas as alternativas de saída, convertendo o conjunto *fuzzy* originado pela inferência em valor numérico (Leite et al., 2010; Schiassi et al., 2015; Lourençoni et al., 2019).

Após a definição das regras do modelo, foi possível obter gráficos bidimensionais para cada variável de saída (Figura 3). De forma geral, os gráficos apontam que a intensidade de  $75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  obteve os melhores resultados, exceto para altura das mudas. Resultado que corrobora o trabalho realizado por Rocha et al. (2014).

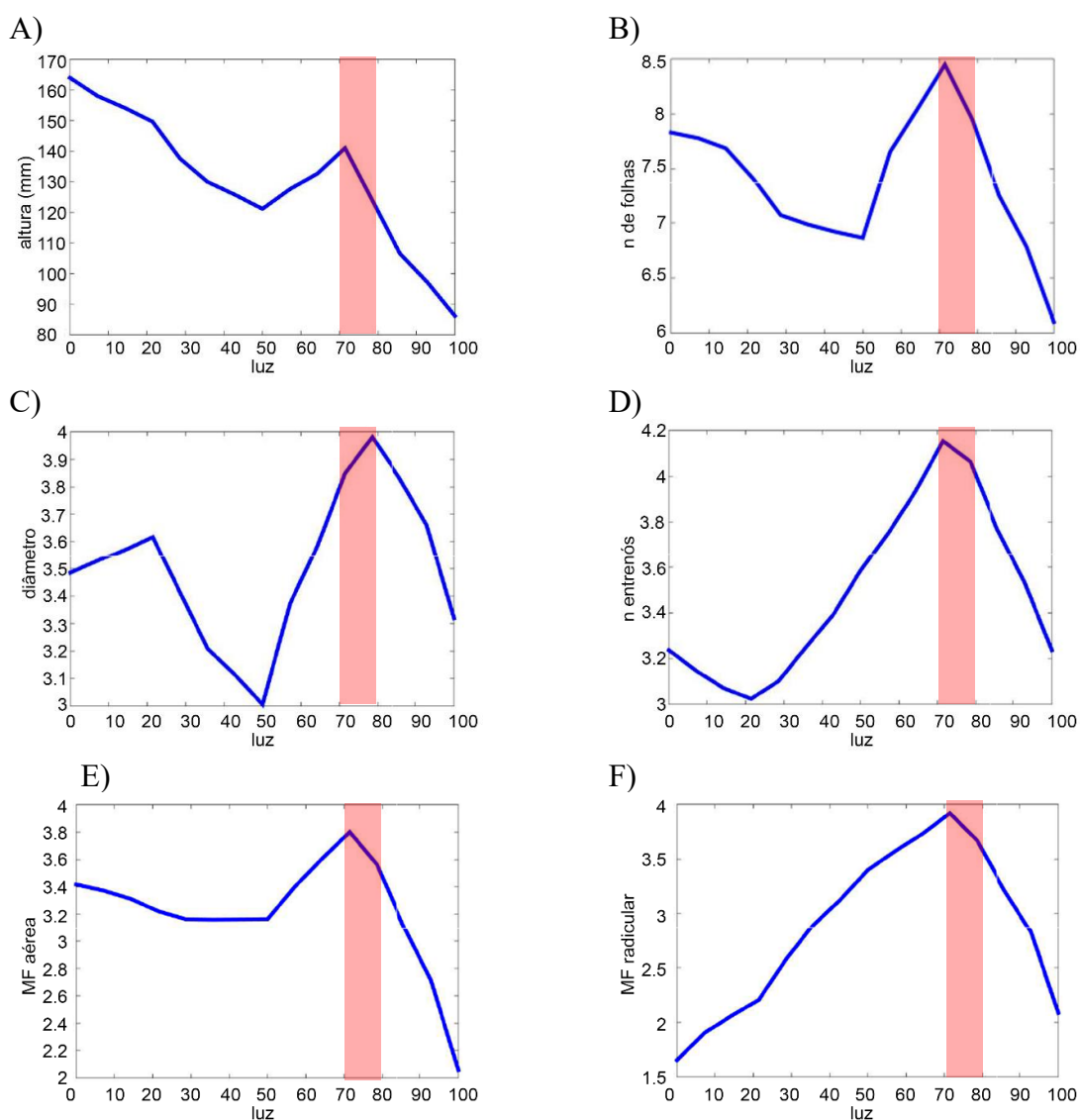


Figura 3. Gráficos das variáveis de saída. A: altura da muda, B: número de folhas, C: diâmetro, D: número entrenós, E: massa fresca da parte aérea, F: massa fresca da parte radicular. Destaque em vermelho para a faixa de iluminação com intensidade de  $75 \mu\text{mol m}^{-2}$ .

Observou-se os índices estatísticos de adequação e precisão do modelo para as respostas altura da muda, número de folhas, diâmetro do colo, número entrenó, massa fresca da parte aérea e massa fresca da parte radicular (Tabela 4). Por meio do erro médio (ME ou BIAS) é possível observar que a diferença dos resultados previstos pelo modelo é baixa para as variáveis calculadas (Bias entre -0,071 e 0,037), apresentando um valor maior apenas para a variável altura da muda (1,324). Valores próximos aos encontrados por Lins et al. (2021 a) avaliando a modelagem *fuzzy* para prever a temperatura ocular e de crista em galinhas poedeiras, que obtiveram Bias de 0,0003 e 0,0019, respectivamente.

Tabela 4. Taxas de erro do modelo: erro médio (ME) ou tendência ou, ainda, BIAS – viés, erro absoluto médio (MAE), erro quadrático médio (MSE), raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), erro percentual absoluto médio (MAPE) e o índice de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE).

	ME=BIAS	MAE	MSE	RMSE	MAPE	NSE
Altura da muda	1,324	3,267	13,901	132,6	2,329	0,978
Número de folhas	-0,009	0,219	0,076	0,276	3,122	0,878
Diâmetro do colo	-0,053	0,101	0,02	0,141	2,963	0,659
Número entrenó	-0,071	0,106	0,014	0,12	2,886	0,941
Massa fresca da parte aérea	-0,038	0,069	0,009	0,096	2,097	0,98
Massa fresca da parte radicular	0,037	0,043	0,003	0,054	1,939	0,996

Os valores de MAE, MSE e RMSE apresentam a dispersão dos valores observados e preditos, e verifica-se novamente que em todas as variáveis, exceto na altura da muda, este valor ficou próximo de zero, o que representa uma baixa dispersão do modelo. O índice que indica a precisão do modelo, o erro percentual absoluto médio (MAPE) apresentou valores entre 1,93% e 3,13% em todas as variáveis, valores abaixo dos encontrados por Lins et al. (2021 a) que foram de 2,90 e 6,30% para o modelo *fuzzy* que prevê a temperatura ocular e de crista em galinhas poedeiras, respectivamente.

Já o índice de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE) ficou próximo a 1 nas variáveis de massa fresca da parte aérea e radicular, número entrenó e altura da muda, sendo ligeiramente menor para o número de folhas e diâmetro do colo. O NSE indica a capacidade preditiva do modelo, sendo os valores mais próximos de 1 indicadores de um melhor desempenho.



Observando os gráficos de dispersão (Figura 4) o modelo *fuzzy* desenvolvido conseguiu prever todas as variáveis com boa eficiência, com correlações variando de 0,90 a 0,99. Diante disso, o modelo foi capaz de prever parâmetros agrônômicos de mudas de pimentão sob diferentes intensidades de luz.

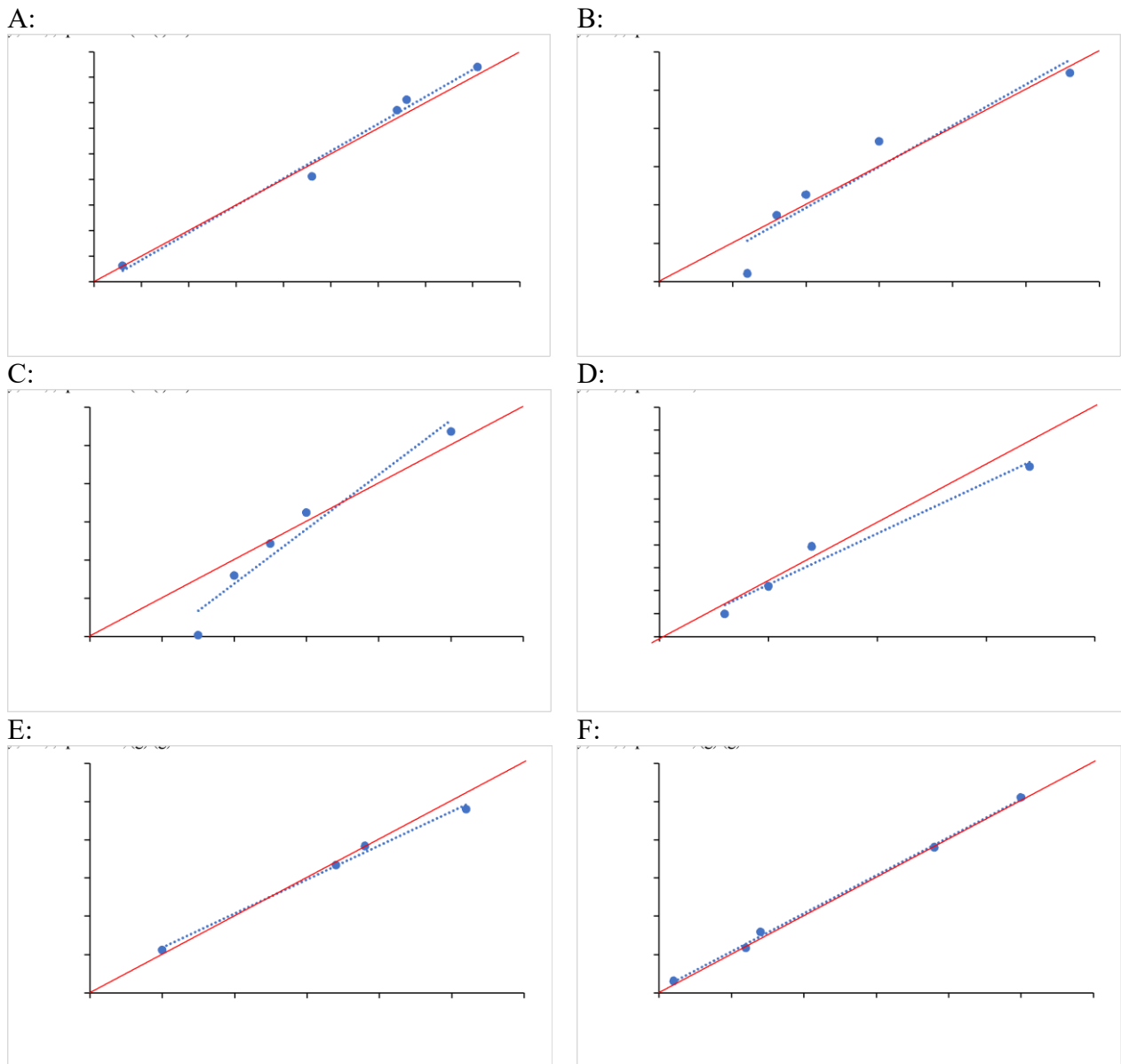


Figura 4. Diagramas de dispersão para A: altura da muda, B: número de folhas, C: diâmetro, D: número entrenós, E: massa fresca da parte aérea e F: massa fresca da parte radicular.

Os resultados mostraram que este sistema de inferência pode ser útil para o desenvolvimento de controladores para o manejo automático da iluminação suplementar na produção de mudas de pimentão, podendo ser avaliado em outras hortaliças.

## **CONCLUSÃO**

O modelo *fuzzy* proposto permitiu estimar com eficiência os parâmetros agronômicos de mudas de pimentão sob diferentes intensidades de luz, ajudando assim na tomada de decisões para um controle eficiente da iluminação suplementar no cultivo de mudas de pimentão.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BEDOYA ODM, JUNIOR TY, PIRES MFA, LOPES MA, LIMA RR (2015) Fuzzy system to predict physiological responses of Holstein cows in southeastern Brazil. *Revista Colombiana de Ciências Pecuárias* 28(1):42-53.

BEZERRA, FC (2003) Produção de mudas de hortaliças em ambiente protegido. Fortaleza, Embrapa Agroindústria Tropical. 22 p.

CLAYPOOL NB, LIETH JH (2020) Physiological responses of pepper seedlings to various ratios of blue, green, and red light using LED lamps. *Scientia Horticulturae* 268:109371. DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109371.

CORNELISSEN AMG, VAN DEN BERG J, KOOPS WJ, KAYMAK U (2002) Elicitation of expert knowledge for fuzzy evaluation of agricultural production systems. *Agriculture, ecosystems & environment* 95(1):1-18.

DÍAZ-GALIÁN MV, TORRES M, SANCHEZ-PAGÁN JD, NAVARRO PJ, WEISS J, EGEA-CORTINES M (2021) Enhancement of strawberry production and fruit quality by blue and red LED lights in research and commercial greenhouses. *South African Journal of Botany* 140:269–275. DOI: 10.1016/j.sajb.2020.05.004.

FILHO LRA, SILVA AO, CREMASCO CP, PUTTI FF (2022) Fuzzy modeling of the effect of irrigation depths on beet cultivars. *Engenharia Agrícola* 42(1): e20210084. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42n1e20210084/2022>

HOAGLAND DR, ARNON DI (1950) The water-culture method for growing plants without soil. *California Agricultural Experiment Station Circular* 347:1-32.

JOSHI NC, RATNER K, EIDELMAN O, BEDNARCZYK D, ZUR N, MANY Y, SHAHAK Y, AVIV-SHARON E, ACHIAM M, GILAD Z, CHARUVI D (2019) Effects of daytime intra-canopy LED illumination on photosynthesis and productivity of bell pepper grown in protected cultivation. *Scientia Horticulturae* 250: 81–88. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.02.039

KOKSAL N, INCESU M, TEKE A (2015) Supplemental LED lighting increases pansy growth. *Horticultura Brasileira* 33(4):428–433. DOI: 10.1590/s0102-053620150000400004.

LEITE MS, FILETI AMF, SILVA FV (2010) Desenvolvimento e aplicação experimental de controladores fuzzy e convencional em um bioprocesso. *Revista Controle & Automação* 21(2):147-158.

LIN CS, YEH PT, CHEN DC, CHIOU YC, LEE CH (2013) The identification and filtering of fertilized eggs with a thermal imaging system. *Computers and Electronics in Agriculture* 91:94-105.

LINS ACSS, LOURENÇONI D, JÚNIOR TY, MIRANDA IB, SANTOS IEA (2021 a) Neuro-fuzzy modeling of eyeball and crest temperatures in egg-laying hens. *Engenharia Agrícola* 41(1):34-38. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n1p34-38/2021>

LINS ACSS, SOUZA IJS, LOURENÇONI D, JÚNIOR TY, SANTOS IEA (2021 b) Fuzzy logic modeling of the ocular temperature of cattle in thermal stress conditions. *Engenharia Agrícola* 41(4):418-426. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n4p418-426/2021>

LOURENÇONI D, YANAGI JUNIOR T, ABREU PG, CAMPOS AT, YANAGI SNM (2019) Productive responses from broiler chickens raised in different commercial production systems - part I: fuzzy modeling. *Engenharia Agrícola* 39(1):1-10.

MANDANI EH (1976) Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. *International Journal of Man-Machine Studies* 8(6):669-678.

PAUCEK I, PENNISI G, PISTILLO A, APPOLLONI E, CREPALDI A, CALEGARI B, SPINELLI F, CELLINI A, GABARRELL X, ORSINI F, GIANQUINTO G (2020) Supplementary LED interlighting improves yield and precocity of greenhouse tomatoes in the mediterranean. *Agronomy* 10(7):1002. DOI: [10.3390/agronomy10071002](https://doi.org/10.3390/agronomy10071002).

PUTTI FF, CREMASCO CP, JUNIOR JFS, FILHO LRA G (2022) Fuzzy modeling of salinity effects on radish yield under reuse water irrigation. *Engenharia Agrícola* 42(1): e215144. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42n1e215144/2022>

RAHMAN MH, AZAD MOK, ISLAM MJ, RANA MS, LI KH, LIM YS (2021) Production of potato (*Solanum tuberosum* L.) seed tuber under artificial led light irradiation in plant factory. *Plants* 10 (2):1–17. DOI: 10.3390/plants10020297.

ROCHA PSG, SANTOS AC, MENEGATTI PWS, AMARAL AS, RODRIGUES APC (2014) Produção de mudas de pimentão sob diferentes intensidades luminosas com LED's. In: 53º Congresso Brasileiro de Olericultura. Palmas, Associação Brasileira de Horticultura.

SANTOS HCA, JUNIOR JAL, SILVA ALP, CASTRO GLS, GOMES RF (2020) Yield of fertigated bell pepper under different soil water tensions and nitrogen fertilization. *Revista Caatinga* 33(1):172-183

SCHIASSI L, JUNIOR TY, FERRAZ PFP, CAMPOS AT, SILVA GR, ABREU LHP (2015) Comportamento de frangos de corte submetidos a diferentes ambientes térmicos. *Engenharia Agrícola* 35(3):390-396.

SEEDAPALEE T, INKHAM C, RUAMRUNGSRI S, JOGLOY S, HONGPAKDEE P (2021) Physiological responses of sun choke's seedlings under different wavelength LED lighting. *Scientia Horticulturae* 282:110029. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110029>

TOMASIELLO S, ALIJANI Z (2021) Fuzzy-based approaches for agri-food supply chains: a mini-review. *Soft Computing* 25(11): 7479-7492. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00500-021-05707-3>

YANAGI JUNIOR T, SCHIASSI L, ABREU LHP, BARBOSA JA, CAMPOS AT (2012) Procedimento fuzzy aplicado à avaliação da insalubridade em atividades agrícolas. *Engenharia Agrícola* 32(3):423-434.

## **ARTIGO II:ILUMINAÇÃO SUPLEMENTAR LED NO CULTIVO DE PIMENTÃO VERDE (*Capsicum annuum*) EM ESTUFA AGRÍCOLA**

### **RESUMO**

A produção em ambiente protegido vem crescendo como uma forma de atender à crescente demanda por alimentos. A iluminação suplementar através de LEDs pode auxiliar estendendo o fotoperíodo de modo a melhorar o crescimento e frutificação das plantas. Com o LED, é possível determinar a composição espectral da luz utilizada, o que pode trazer diferentes respostas a depender da cultura a ser cultivada. O presente trabalho teve como objetivo identificar e avaliar as respostas fisiológicas e de produtividade do pimentão verde sob iluminação suplementar com lâmpadas LED de diferentes composições de cores. Foi realizado um experimento com o cultivo de pimentão em uma estufa, onde 5 tratamentos com iluminação suplementar de diferentes composições espectrais foram utilizados: produtivo (LEDs 38% vermelho + 42% azul + 20% branco), amplo espectro (LEDs 66% vermelho + 23% azul + 11% branco), vegetativo (LEDs 100% vermelho), produtivo+amplo espectro (LEDs 38% vermelho + 42% azul + 20% branco até a fase de floração e 66% vermelho + 23% azul + 11% branco após a fase de floração) e produtivo+vegetativo (LEDs 38% vermelho + 42% azul + 20% branco até a fase de floração e 100% vermelho após a fase de floração) . O tratamento testemunha não recebeu iluminação suplementar. A análise dos resultados mostrou que todos os tratamentos com iluminação suplementar foram benéficos às variáveis fisiológicas da planta – número de folhas, altura da planta e diâmetro do caule – sendo o tratamento vegetativo (100% LEDs vermelhos) o que obteve melhor resultado em todas as variáveis. Entretanto, para as variáveis de produtividade, os tratamentos com iluminação LED não resultaram em vantagens consideráveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** Iluminação suplementar; LED; Qualidade da luz.

## **ABSTRACT**

Production in protected environments is growing as a way of meeting the growing demand for food. Supplementary lighting using LEDs can help by extending the photoperiod to improve plant growth and fruiting. With LEDs, it is possible to determine the spectral composition of the light used, which can bring different responses depending on the crop to be grown. The aim of this study was to identify and evaluate the physiological and productivity responses of green peppers under supplementary lighting with LED lamps of different color compositions. An experiment was carried out growing peppers in a greenhouse, where 5 treatments with supplementary lighting of different spectral compositions were used: productive (LEDs 38% red + 42% blue + 20% white), broad spectrum (LEDs 66% red + 23% blue + 11% white), vegetative (LEDs 100% red), productive+broad spectrum (LEDs 38% red + 42% blue + 20% white until the flowering stage and 66% red + 23% blue + 11% white after the flowering stage) and productive+vegetative (LEDs 38% red + 42% blue + 20% white until the flowering stage and 100% red after the flowering stage) . The control treatment received no supplementary lighting. Analysis of the results showed that all the treatments with supplementary lighting were beneficial to the plant's physiological variables - number of leaves, plant height and stem diameter - with the vegetative treatment (100% red LEDs) obtaining the best results in all variables. However, for the productivity variables, the LED lighting treatments did not result in considerable advantages.

**KEY WORDS:** Supplemental lighting; LED; Light quality.

Artigo redigido conforme normas da Revista de Engenharia Agrícola

## INTRODUÇÃO

A produção de culturas em estufas é uma forma importante de atender à crescente demanda de alimentos em todo o mundo visto que o ambiente controlado permite a produção de culturas em climas e estações que de outra forma inviabilizariam o crescimento, prolongando os períodos de cultivo de culturas sazonais (Iddio et al., 2020). Sendo assim, é importante que a produção em estufas ocorra de forma otimizada, de modo a utilizar eficientemente os recursos naturais e humanos disponíveis.

Os recentes avanços da tecnologia de precisão, processamento de dados e a chamada "*smart farming*" estão mudando o cenário da agricultura protegida, transformando estufas simples em *plant factories* de alta tecnologia que otimizam a produtividade das plantas e o trabalho humano (Shamshiri et al., 2018).

Um dos sistemas comumente utilizados na produção de hortaliças em estufas é a iluminação suplementar. Este conceito existe desde os anos 1860 com as primeiras publicações a respeito do cultivo de espécies sob iluminação artificial e desde o século XIX é aplicado na produção comercial de culturas (Gupta e Agarwal, 2017).

A suplementação luminosa é interessante ao cultivo pois pode ser utilizada em períodos nublados para complementar a iluminação natural insuficiente, ou no período noturno, de forma a estender o fotoperíodo. É uma forma de aumentar a quantidade de luz recebida pela planta, com o objetivo de aumentar a produção de mudas e melhorar seu crescimento (Bantis et al., 2018). Deste modo, seria possível encurtar os ciclos de produção e melhorar os rendimentos das colheitas (Weaver; Van Iersel; Velni, 2019).

As lâmpadas de vapor de sódio foram, por muito tempo, as mais comumente utilizadas no cultivo protegido por apresentarem alta iluminação e baixo consumo de energia – comparado à outras lâmpadas de descarga de gás, como as fluorescentes (Gupta e Agarwal, 2017). Porém, com o avanço tecnológico surgiram as lâmpadas LED (*light-emitting diode*) que proporcionam maior iluminação



com um baixo consumo energético. A substituição de sistemas de iluminação por LEDs representou uma grande economia para os produtores, e estas vêm se tornando cada vez mais comuns em estufas.

Além do baixo consumo energético, atribui-se ao LED uma maior eficiência na conversão de energia elétrica em radiação fotossinteticamente ativa (PAR), que é a faixa de radiação utilizada pelas plantas para a realização da fotossíntese (Kuijpers et al., 2020).

Outra vantagem significativa das lâmpadas de LED é sua capacidade de individualização dos espectros de luz nas cores vermelha, verde e azul (RGB), possibilitando a utilização de uma variedade de combinações de cores durante o processo de cultivo. Isso proporciona à planta acesso a diversas faixas do espectro de luz visível. Pesquisas conduzidas com a implementação de iluminação suplementar por meio de lâmpadas de LED em estufas têm demonstrado que diferentes faixas do espectro luminoso desencadeiam respostas fisiológicas e níveis de produtividade distintos (Joshi et al., 2019; Claypool e Lieth, 2020; Díaz-Galián et al., 2021; Paucek et al., 2020).

Singh et al. (2015) afirma que a luz vermelha (com comprimento de onda na faixa entre 610 e 720 nm) é necessária para o desenvolvimento do aparato fotossintético e fotossíntese, enquanto a luz azul (400-500 nm) é importante para a síntese de clorofila, desenvolvimento de cloroplasto, abertura estomática e fotomorfogênese.

Em geral, os estudos com o cultivo de hortaliças sob iluminação suplementar com LED indicam aumentos na produção gerado pela suplementação luminosa (Adibian et al., 2023; Kwon et al., 2023; Appolloni et al., 2021; Maeda et al., 2022). Porém, é importante salientar que a maioria destes estudos foi realizada em locais com clima temperado, marcados por longos períodos nublados. Diante do exposto, existe uma lacuna de estudos sobre iluminação suplementar em regiões tropicais com altos índices de radiação solar, como na região submédio do Vale do São Francisco. O presente artigo visa entender se, mesmo em regiões com alta radiação solar durante todo o ano, a iluminação suplementar tem impacto na produção em ambiente protegido.

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho, identificar e avaliar as respostas fisiológicas e de produtividade do pimentão verde cultivados em ambiente protegido no submédio do

Vale do São Francisco sob iluminação suplementar com lâmpadas LED de diferentes composições de cores. Para tanto, foi realizado um experimento com o cultivo de pimentão verde em estufa, onde a cultura foi submetida a iluminação suplementar com diferentes composições de cores de LED. Posteriormente os resultados fisiológicos e de produção foram analisados e comparados com o tratamento testemunha, que não recebeu iluminação suplementar.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido durante o período de 22 de março a 18 de agosto de 2023 (outono e inverno) em uma estufa agrícola localizada no campus de Juazeiro da UNIVASF, Bahia, na região do Vale do São Francisco. A estufa de policarbonato possui 12 metros de largura e 20 metros de comprimento, e conta com um sistema de resfriamento evaporativo. Segundo a classificação de Köppen, o clima do município é do tipo BSh', árido quente (Teixeira, 2010).

A cultura escolhida para ser cultivada foi a do pimentão verde (*Capsicum annuum*) devido ao seu alto valor agregado, juntamente com a curta duração do seu ciclo e sua resistência a pragas. Para isso, foram adquiridas mudas de pimentão verde da variedade itamara com garantia de qualidade em uma empresa especializada em produção e venda de mudas de hortaliças da região.

As mudas de pimentão foram plantadas, uma por vaso com capacidade de 11L de substrato no dia 22 de março. O substrato utilizado foi o condicionador de solo classe A - Lupatec. A irrigação foi realizada diariamente por meio de gotejamento tomando por base o cálculo da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), equação 1.

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (1)$$

em que ET<sub>c</sub> é a evapotranspiração da cultura (mm/dia); ET<sub>o</sub> é a evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>); K<sub>c</sub> é o coeficiente da cultura.

Os valores de ETo foram obtidos do site do Laboratório de Meteorologia da UNIVASF, sendo estes dados coletados diariamente pela estação meteorológica da UNIVASF campus Juazeiro. Foram utilizados os valores de Kc para cada estágio fenológico definidos por Braga e Marouelli (2017).

Com 30 e 60 dias de plantados, as mudas receberam adubação com formulação 16-16-16. Os vasos foram locados com espaçamento de 0,8m entre linha e 0,5m entre plantas (Figura 1).



Figura 1: Esquema de distribuição dos tratamentos e parcelas.

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente ao acaso (DIC) em fatorial simples, onde continham seis níveis de tratamento, um sem iluminação suplementar (Testemunha) e os demais recebiam 3 horas de iluminação suplementar (de 18h às 21h) diariamente com diferentes proporções de LEDs vermelhos, azuis e brancos, conforme tabela 1. A iluminação suplementar era realizada por meio de 4 luminárias LED modelo Grow Light Full Spectrum por tratamento (Figura 1), e ficavam suspensas a 1,4m do chão.

Tabela 1. Tratamentos utilizados, suas composições de cores e intensidade de radiação.

Parcela	Tratamento	Proporções de LEDs	PAR (Radiação fotossinteticamente ativa) média por hora em W/m <sup>2</sup>
1	Produtivo	38% vermelho + 42% azul + 20% branco	1,16 W/m <sup>2</sup>
2	Amplo espectro	66% vermelho + 23% azul + 11% branco	2,27 W/m <sup>2</sup>
3	Vegetativo	100% vermelho	1,14 W/m <sup>2</sup>
4	Produtivo + amplo espectro	38% vermelho + 42% azul + 20% branco até a fase de floração	1,16 W/m <sup>2</sup>
		66% vermelho + 23% azul + 11% branco após a fase de floração	2,27 W/m <sup>2</sup>
5	Produtivo + vegetativo	38% vermelho + 42% azul + 20% branco até a fase de floração	1,16 W/m <sup>2</sup>
		100% vermelho após a fase de floração	1,14 W/m <sup>2</sup>
6	Testemunha	Sem iluminação artificial	-

As parcelas 4 e 5 receberam inicialmente o tratamento produtivo (assim como a parcela 1), mas ao chegar no início da fase de floração (que ocorreu no dia 19 de maio) a iluminação destas parcelas foi modificada. A parcela 4 passou a receber o tratamento de amplo espectro e a parcela 5 passou a receber o tratamento vegetativo. Ambas seguiram com estes tratamentos até o fim do experimento.

Os valores de radiação produzida pelas luminárias LED foram medidos com auxílio de dois piranômetros equipados com filtros GG 395 e RG 695 para obter-se a faixa de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) de cada tratamento (Tabela 1).

Durante o período em que recebiam a iluminação suplementar (das 18 às 21h), as parcelas eram separadas por lonas pretas para impedir a interferência entre os tratamentos (Figura 2A). Durante o dia as lonas eram abaixadas para evitar o sombreamento (Figura 2B).

A.



B.



Figura 2: Parcelas separadas com lonas no período noturno (A) e no período diurno (B).

Durante o período do experimento foram realizadas 4 colheitas de frutos, nos dias 06 de junho, 06 de julho, 21 de julho e 16 de agosto. Os frutos foram pesados com balança de precisão (Tecnal, modelo B-TEC-8055, resolução de 0,01g), e a altura e diâmetro foram medidos com paquímetro digital (Pantec, modelo 11112B-150, resolução de 0,01mm).

Semanalmente foi realizada a coleta de dados fisiológicos das plantas, sendo eles: Altura da planta, medida em centímetros com o auxílio de fita métrica, número de folhas realizada por contagem direta e diâmetro do caule, medida em milímetros com auxílio de paquímetro digital (Pantec, modelo 11112B-150, resolução de 0,01mm).

A análise de variância foi realizada com auxílio do software SISVAR e comparados pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados obtidos mostrou uma interferência positiva dos tratamentos com iluminação suplementar nos aspectos fisiológicos das plantas ( $p < 0,01$ , teste F). Os tratamentos vegetativo, produtivo, de amplo espectro e produtivo + amplo espectro obtiveram os melhores resultados para a variável número de folhas, seguido do produtivo + vegetativo e por último a testemunha (Tabela 2). O tratamento vegetativo proporcionou um número de folhas 38,45% maior que a testemunha.

Tabela 2. Resultados da variável número de folhas.

Tratamento	Nº de folhas
Produtivo	61.03 a
Ampla espectro	61.04 a
Vegetativo	64.53 a
Produtivo + ampla espectro	58.90 a
Produtivo + vegetativo	52.94 b
Testemunha	46.61 c

Médias seguidas de letras diferentes, diferem entre si pelo teste Tukey ao nível de 5%. CV = 32,07%.

Naznin et al. (2019) obteve resultados semelhantes ao comparar diferentes combinações de LEDs azuis e vermelhos no crescimento de alface, espinafre, couve, manjeriço e pimentão em uma câmara de crescimento. Foi observado que o número de folhas do manjeriço e pimentão foi maior sob o tratamento de luz 95% vermelha + 5% azul, indicando que a luz vermelha pode ter o efeito de estímulo ao aumento número de folhas da planta, corroborando os resultados obtidos neste experimento com o tratamento vegetativo (composto de luzes 100% vermelhas).

Com relação à altura das plantas também foram observadas diferenças significativas entre tratamentos ( $p < 0,01$ , teste F), sendo o tratamento vegetativo o que obteve o melhor resultado, com uma média de 93,33cm de altura ao fim do experimento, 26,12% maior que a testemunha. Em seguida, os tratamentos ampla espectro e produtivo + ampla espectro e por último os tratamentos produtivo, produtivo + vegetativo e testemunha (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados da variável altura da planta.

Tratamento	Altura média da planta (cm) ao longo do experimento	Altura média da planta (cm) ao final do experimento
Produtivo	55.62 c	75,33 c
Ampla espectro	65.96 b	90,33 b
Vegetativo	75.14 a	93,33 a
Produtivo + ampla espectro	66.85 b	89,16 b
Produtivo + vegetativo	56.03 c	82,83 c
Testemunha	54.22 c	74 c

Médias seguidas de letras diferentes, diferem entre si pelo teste Tukey ao nível de 5%. CV = 19,01%.

Esse resultado corrobora os resultados obtidos por Naznin et al. (2019), onde a altura da planta de alface, couve e pimentão aumentou significativamente sob o tratamento com luzes 100% vermelhas, semelhante ao tratamento vegetativo utilizado neste experimento.

Tang et al. (2019) analisou o crescimento de mudas de pimentão cultivadas em ambiente protegido sob LEDs brancos. Ele comparou tratamentos com suplementação luminosa vermelha e azul (4:1) por 1h, 3h e 5h em comparação com a testemunha (apenas LEDs brancos) e concluiu que 3h de suplementação diária com luzes vermelhas e azuis (4:1) resultaram em mudas 68% mais altas que as cultivadas sob LEDs brancos, o que corrobora os resultados da pesquisa atual, onde os tratamentos de 3h de suplementação luminosa com maior porcentagem de luz vermelha (vegetativo: 100% vermelho) obtiveram os melhores resultados para altura da planta, chegando a altura média de 93,33cm ao fim do experimento.

Analisando o gráfico de alturas médias das plantas ao longo do cultivo (Figura 3), observa-se o desenvolvimento em cada tratamento. A troca de iluminação dos tratamentos produtivo + vegetativo e produtivo + amplo espectro ocorreu no dia 19 de maio, ou seja, as plantas do tratamento produtivo + vegetativo receberam – durante a maior parte do experimento – iluminação 100% vermelha (tratamento vegetativo). Entretanto o desenvolvimento das plantas não foi tão bom quanto as que receberam o tratamento vegetativo desde o início do cultivo. Isso indica que a faixa vermelha do espectro do LED pode exercer maior influência no desenvolvimento da planta quando aplicada no início do cultivo.

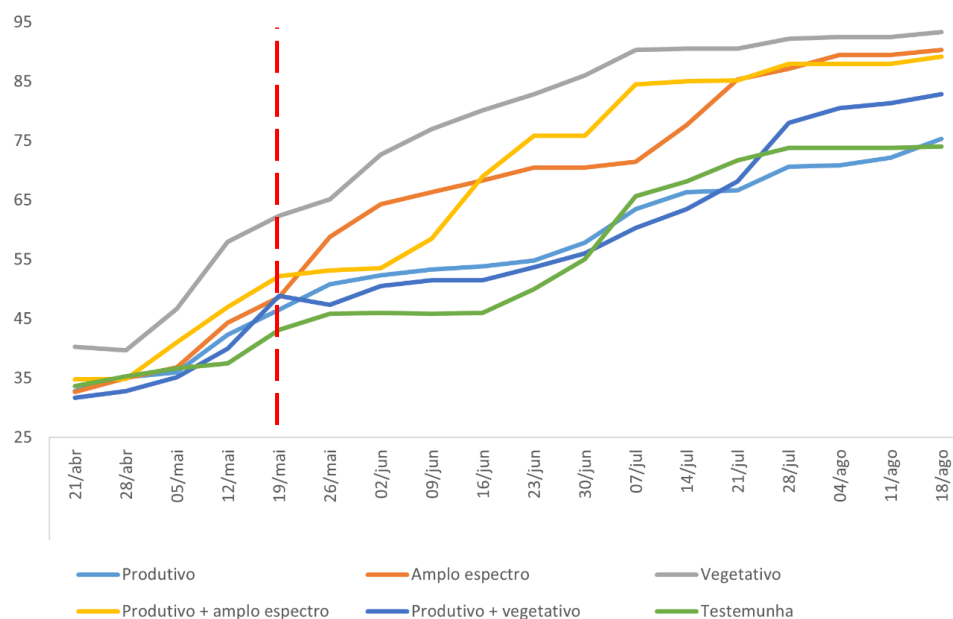


Figura 3. Altura média da planta (cm) durante o período de cultivo.

Avaliando o diâmetro do caule, observou-se diferença significativa entre tratamentos avaliados ( $p < 0,01$ , teste F), sendo vegetativo com melhor resultado, seguido pelo amplo espectro e produtivo + amplo espectro, produtivo, produtivo + vegetativo e por último a testemunha (Tabela 4).

Tabela 4. Resultados da variável diâmetro do caule.

Tratamento	Diâmetro do caule (mm)
Produtivo	8.61 c
Amplo espectro	9.05 b
Vegetativo	9.46 a
Produtivo + amplo espectro	9.08 b
Produtivo + vegetativo	7.90 d
Testemunha	7.41 e

Médias seguidas de letras diferentes, diferem entre si pelo teste Tukey ao nível de 5%. CV = 16,51%.

Semelhantemente, Li et al. (2016) em seu experimento com suplementação luminosa no cultivo de pimentões, concluiu que todos os tratamentos com diferentes proporções de LEDs vermelhos e azuis resultaram em maior diâmetro do caule em relação a testemunha (sem iluminação suplementar), e o tratamento com maior proporção de vermelho (vermelho 8:1 azul) produziu plantas com maiores diâmetros do caule, 20,83% maiores que a testemunha.



Analisando as respostas produtivas, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos para o peso médio, produção e diâmetro dos frutos ( $p < 0,05$ , teste F). Todos os tratamentos apresentaram valores de produção por hectare abaixo da média nacional que está entre 25 e 40 t/ha (Henz et al., 2007). Apenas a variável comprimento dos frutos apresentou diferença significativa ( $p < 0,05$ , teste F) sendo o tratamento produtivo + vegetativo o que obteve o melhor resultado (Tabela 5).

Tabela 5. Resultados das variáveis de produtividade para cada tratamento.

Tratamento	Peso médio dos frutos (g)	Diâmetro dos frutos (mm)	Comprimento dos frutos (mm)	Produção (t/ha)
Produtivo	73.46 a	46.17 a	95.48 b	14,71 a
Ampla espectro	44.20 a	45.95 a	94.37 b	11,59 a
Vegetativo	87.78 a	48.37 a	95.23 b	16,06 a
Produtivo + ampla espectro	56.36 a	47.89 a	98.55 b	14,27 a
Produtivo + vegetativo	65.63 a	46.60 a	113.02 a	9,63 a
Testemunha	46.72 a	46.56 a	100.82 b	16,61 a
Coefficiente de variação	54.38%	26.10%	21.77%	53.96%

Médias seguidas de letras diferentes na coluna, diferem entre si pelo teste Tukey ao nível de 5%.

Com base nos resultados, nota-se que a iluminação suplementar não teve influência sobre a massa média e diâmetro dos frutos, obtendo peso médio de 62,36g e diâmetro médio de 49,92mm por fruto. Já o comprimento do fruto no tratamento produtivo + vegetativo ficou 16,65% maior que média dos demais (96,89mm).

Tais dados contrastam com os resultados obtidos por diversos autores que em seus experimentos constataram um aumento na produtividade do pimentão quando submetidos a suplementação luminosa com LED (Li et al., 2016; Joshi et al., 2019; Ratner et al., 2020; Paucek et al., 2020; Tiwari et al., 2022).

Adibian et al. (2023), em seu experimento com o cultivo de pimentão com iluminação suplementar LED em duas estações – inverno e verão – concluiu que as diferenças de produtividade entre os tratamentos com LED são mais significativas em estações onde os níveis de radiação solar são menores. É possível que, no experimento do presente trabalho, a suplementação luminosa não

tenha resultado em diferenças significativas na variável de produção por conta dos níveis de radiação do clima local, que já são altos (Figura 4).

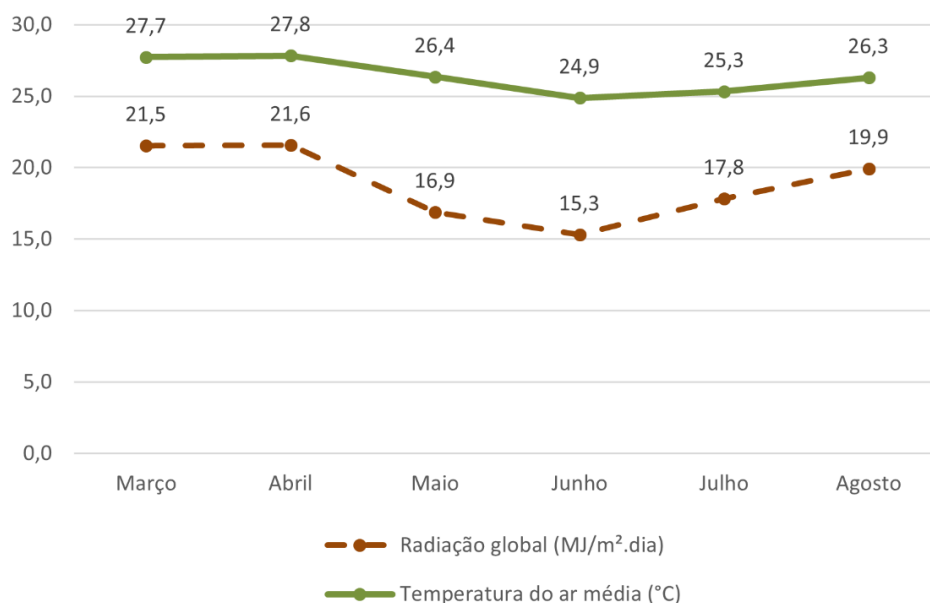


Figura 4: Gráfico de temperaturas médias e radiação global para a cidade de Juazeiro-BA de março a agosto de 2023.

Por fim, os resultados indicam que a faixa do espectro de luz vermelha pode ser interessante no cultivo de espécies de hortaliças folhosas por auxiliar no crescimento das plantas e no aumento do número de folhas – o que é comercialmente interessante para este tipo de hortaliça.

Como consideração final desta pesquisa, sugere-se a investigação com uso da iluminação suplementar 100% vermelha na fase de crescimento das plantas e a partir da fase de floração, não suplementar. Blat e Costa (2007) afirmam que o florescimento, frutificação e maturação dos frutos do pimentão são mais precoces em dias curtos. Assim, a hipótese é que a suplementação até a fase de floração ajudaria a produzir plantas mais robustas, e em seguida, a diminuição do fotoperíodo faria a produção de frutos aumentar.

## CONCLUSÃO

A iluminação suplementar se mostrou benéfica às variáveis fisiológicas da planta – número de folhas, altura da planta e diâmetro do caule – sendo o tratamento vegetativo (100% LEDs vermelhos) o que obteve melhor resultado em todas as variáveis.

Para a região de estudo, devido as suas características climatológicas, os tratamentos com iluminação LED não resultaram em vantagens consideráveis em relação a variáveis de produtividade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APPOLLONI E, ORSINI F, PENNISI G, GABARRELL DURANY X, PAUCEK I, GIANQUINTO G (2021) Supplemental LED Lighting Effectively Enhances the Yield and Quality of Greenhouse Truss Tomato Production: Results of a Meta-Analysis. *Front. Plant Sci.* 12:596927. doi: 10.3389/fpls.2021.596927

BANTIS F, SMIRNAKOU S, OUZOUNIS T, KOUKOUNARAS A, NTAGKAS N, RADOGLIOU K (2018) Current status and recent achievements in the field of horticulture with the use of light-emitting diodes (LEDs). *Scientia Horticulturae* 235:437–451.

BLAT SF, COSTA CP (2007) A cultura do pimentão. Piracicaba: ESALQ – Divisão de Biblioteca e Documentação.

BRAGA MB, MAROUELLI WA (2017) Produção Integrada de Pimentão – PIP: Irrigação e Fertirrigação na Cultura do Pimentão. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças.

CLAYPOOL NB, LIETH JH (2020) Physiological responses of pepper seedlings to various ratios of blue, green, and red light using LED lamps. *Scientia Horticulturae*, 268:109371.

DÍAZ-GALIÁN MV, TORRES M, SANCHEZ-PAGÁN JD, NAVARRO PJ, WEISS J, EGEA-CORTINES M (2021) Enhancement of strawberry production and fruit quality by blue and red LED lights in research and commercial greenhouses. *South African Journal of Botany* 140:269-275.

GUPTA SD, AGARWAL A (2017) Artificial Lighting System for Plant Growth and Development: Chronological Advancement, Working Principles, and Comparative Assessment. In: GUPTA, S Dutta. *Light Emitting Diodes for Agriculture*. Singapura: Springer Nature, p.1-25.

HENZ GP, COSTA CSR, CARVALHO S, BANCI CA (2007) Como cultivar pimentão. *Cultivar Hortaliças e Frutas* 8(42).

IDDIO E, WANG L, THOMAS Y, MCMORROW G, DENZER A (2020) Energy efficient operation and modeling for greenhouses: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 117: 109480.

JOSHI NC, RATNER K, EIDELMAN O, BEDNARCZYK D, ZUR N, MANY Y, SHAHAK Y, AVIV-SHARON E, ACHIAM M, GILAD Z, CHARUVI D (2019) Effects of daytime intra-canopy LED illumination on photosynthesis and productivity of bell pepper grown in protected cultivation. *Scientia Horticulturae* 250:81–88.

KUIJPERS WJP, KATZIN D, MOURIK SV, ANTUNES DJ, HEMMING S, MOLENGRAFT MJG (2020) Lighting systems and strategies compared in an optimally controlled greenhouse. *Biosystems Engineering* 202:195–216.

KWON YB, LEE JH, ROH YH, CHOI IL, KIM Y, KIM J, KANG HM (2023) Effect of Supplemental Inter-Lighting on Paprika Cultivated in an Unheated Greenhouse in Summer Using Various Light-Emitting Diodes. *Plants* 12(8):1684. <https://doi.org/10.3390/plants12081684>

LI X, LU W, HU G, WANG XC, ZHANG Y, SUN GX, FANG Z (2016) Effects of Light-emitting Diode Supplementary Lighting on the Winter Growth of Greenhouse Plants in the Yangtze River Delta of China. *Botanical Studies* 57(1).

MAEDA K, MASUDA E, TAMASHIRO T, MAHARJAN G, MARUO T (2022) Comparison of Supplemental LED Top- and Interlighting for Year-Round Production of Cherry Tomato. *Agronomy* 12(8):1878. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081878>

NAZNIN MT, LEFSRUD M, GRAVEL V, AZAD MOK (2019) Blue Light added with Red LEDs Enhance Growth Characteristics, Pigments Content, and Antioxidant Capacity in Lettuce, Spinach, Kale, Basil, and Sweet Pepper in a Controlled Environment. *Plants* 8(93).

PAUCEK I; PENNISI G; PISTILLO A; APPOLLONI E; CREPALDI A; CALEGARI B; SPINELLI F; CELLINI A; GABARRELL X; ORSINI F; GIANQUINTO G (2020) Supplementary LED interlighting improves yield and precocity of greenhouse tomatoes in the mediterranean. *Agronomy* 10(7):1002.

RATNER K, JOSHI NC, YADAV D, MANY Y, KAMARA I, ESQUIRA I, ACHIAM M, GILAD Z, CHARUVI D (2020) Application of LED-interlighting for improving the yield of passive tunnel-grown bell pepper. *Acta Horticulturae* 1268:19-26

SHAMSHIRI RR; KALANTARI F; TING KC; THORP KR; HAMEED IA; WELTZIEN C; AHMAD D; SHAD Z (2018) Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 11(1):1–22.

SINGH D, BASU C, MEINHARDT-WOLLWEBER M, ROTH B (2015) LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49:139–147.

TANG Z, YU J, XIE J, LYU J, FENG Z, DAWUDA MM, LIAO W, WU Y, HU L (2019) Physiological and Growth Response of Pepper (*Capsicum annum* L.) Seedlings to Supplementary Red/Blue Light Revealed through Transcriptomic Analysis. *Agronomy* 9(139).

TEIXEIRA AHC (2010) Informações agrometeorológicas do polo Petrolina, PE/Juazeiro - 1963 a 2009. Petrolina: Embrapa Semiárido.

TIWARI V, KAMARA I, RATNER K, MANY Y, LUKYANOV V, ZIV C, GILAD Z, ESQUIRA I, CHARUVI D (2022) Daytime or Edge-of-Daytime Intra-Canopy Illumination Improves the Fruit Set of Bell Pepper at Passive Conditions in the Winter. *Plants* 11(3).

WEAVER GM, VAN IERSEL MW, VELNI JM (2019) A photochemistry-based method for optimising greenhouse supplemental light intensity. *Biosystems Engineering* 182:123–137.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo entender as respostas da cultura do pimentão à iluminação suplementar com LEDs e investigar as possibilidades de controle do sistema de iluminação através da modelagem *fuzzy* na região do Sub-médio do Vale do São Francisco.

O primeiro artigo desenvolveu um modelo *fuzzy* capaz de prever com eficiência parâmetros agronômicos de mudas de pimentão sob diferentes intensidades de luz, o que pode auxiliar na tomada de decisões para um controle eficiente da iluminação suplementar no cultivo desta hortaliça.

O segundo artigo identificou e avaliou as respostas fisiológicas e de produtividade do pimentão verde sob iluminação suplementar com lâmpadas LED de diferentes composições de cores, e mostrou os benefícios que a iluminação com LEDs trouxe às variáveis fisiológicas da planta, destacando o desempenho da iluminação com LEDs 100% vermelhos – que obtiveram os melhores resultados.

Foi possível identificar que para a região de estudo, a iluminação suplementar não resultou em vantagens consideráveis para as variáveis de produtividade.

Como consideração final desta pesquisa, sugere-se a investigação com uso da iluminação suplementar 100% vermelha na fase de crescimento das plantas e a partir da fase de floração, não suplementar. A hipótese é que a suplementação até a fase de floração ajudaria a produzir plantas mais robustas, e em seguida, a diminuição do fotoperíodo faria a produção de frutos aumentar.