

USO DE DIODOS EMISSORES DE LUZ (LED) NA FISILOGIA DE PLANTAS CULTIVADAS – REVISÃO

Luiz Eduardo Santos Lazzarini¹; Fernanda Ventorim Pacheco¹; Samia Torres Silva¹; Adriane Duarte Coelho¹; Ana Paula Ribeiro Medeiros¹; Suzan Kelly Vilela Bertolucci¹; José Eduardo Brasil Pereira Pinto¹; Joyce Doria Rodrigues Soares^{1*}

SAP 16972 Data envio: 26/05/2017 Data do aceite: 31/05/2017
Sci. Agrar. Parana., Marechal Cândido Rondon, v. 16, n. 2, abr./jun., p. 137-144, 2017

RESUMO - Objetivou-se demonstrar os efeitos da utilização de lâmpadas LEDs na fisiologia de plantas cultivadas. Diodos de emissão de luz (LED) têm sido propostos como fonte luminosa para ambientes controlados ou em câmaras de crescimento de plantas, pois apresentam características desejáveis para o desenvolvimento de plantas. O desenvolvimento e a fisiologia das plantas são fortemente influenciados pelo espectro de luz do ambiente proporcionado pelos LEDs, dentre as quais podemos citar o da luz azul, vermelha, verde e combinações. A luz azul, por exemplo, apresenta uma série de papéis fotomorfogênicos importantes para as plantas, incluindo o controle dos estômatos. Estudos indicam que o comprimento de onda vermelho é eficientemente absorvido pelos pigmentos presentes nas plantas, pois seu comprimento de onda está muito próximo do pico de absorção da clorofila. A relevância das respostas à luz verde é baseada na suposição de que existem situações na natureza que a planta pode encontrar condições aumentadas de radiação verde no seu ambiente de crescimento. As lâmpadas LEDs oferecem muitas vantagens como fontes de radiação para as plantas, mas existem dificuldades que retardam a sua implementação para aplicações no cultivo de plantas. Com o avanço das tecnologias, as características e o desempenho das lâmpadas LEDs como fontes de radiação para as plantas, tendem a melhorar cada vez mais. Porém, essa eficiência varia entre os espectros de luz e as espécies. Assim, os avanços na utilização dos LEDs no cultivo protegido de plantas cultivadas estão atrelados às respostas fisiológicas específicas de cada espécie.

Palavras-chave: clorofila, energia luminosa, espectros luminosos, fotossíntese, pigmentos.

USE OF LIGHT-EMITTING DIODE (LED) IN THE PHYSIOLOGY OF CULTIVATED PLANTS – REVIEW

ABSTRACT - The objective of this study was to demonstrate the effects of the use of LED bulbs in the physiology of cultivated plants. Light-emitting diodes (LEDs) have been proposed as a light source for controlled environments or in plant growth chambers, since they have desirable characteristics for plant development. The development and physiology of plants are strongly influenced by the environment light spectrum provided by the LEDs, among which we can mention the blue, red, green, and their combinations. The blue light, for example, is responsible for a number of important photomorphogenetic features in plants, including stomatal control. Studies indicate that the red wavelength is efficiently absorbed by the pigments present in the plants, since its wavelength is very close to the absorption peak of chlorophyll. The relevance of green light responses is based on the assumption that there are situations in nature that the plant may find conditions of increased green radiation in its growing environment. LED bulbs offer many advantages as radiation sources for plants, but there are difficulties that delay their implementation for applications in the plant cultivation. With the advancement of technologies, the characteristics and performance of LED bulbs, as a source of radiation for plants, tend to be improved. However, this efficiency varies among the light spectra and the species. Thus, the advancement in the use of LEDs in the protected cultivation of cultivated plants is linked to specific physiological responses of each species.

Key words: chlorophyll, light energy, light spectrum, photosynthesis, pigments.

INTRODUÇÃO

O extrativismo desordenado associado ao acelerado crescimento da população mundial, a produção de alimentos e o fornecimento de energia tem promovido perdas de espécies e desenvolvimento de tecnologias de propagação. O cultivo *in vitro* trata-se de uma alternativa promissora para evitar a produção limitada de alimentos e

garantir a segurança alimentar da população (US-CAMAS et al., 2014).

Células vegetais *in vitro* e técnicas de cultura de tecidos são a base de vários programas de micropropagação e melhoramento genético de plantas, além de apresentarem um papel importante na pesquisa científica (ROBERT et al., 1992; MIGUEL; MARUM,

¹Universidade Federal de Lavras, Departamento de Agricultura, Campus Universitário, Caixa Postal 37, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil. E-mail: joyce.soares@dag.ufla.br. *Autor para correspondência

2011; PEÑA-RAMÍREZ, 2012). Entretanto, durante o cultivo *in vitro* as plantas são submetidas à condições específicas no microambiente em que estão sendo cultivadas, que podem ser um fator limitante para o seu ideal desenvolvimento. Por exemplo, os componentes do meio de cultura em que estão inseridas, a adição exógena de reguladores de crescimento, a umidade dentro do recipiente de cultivo, e as condições de luz que recebem nas câmaras de crescimento são alguns dos fatores que afetam o cultivo *in vitro* (US-CAMAS et al., 2014).

As plantas utilizam a luz como fonte de energia no processo de fotossíntese e respondem a essa energia luminosa de acordo com a sua intensidade, comprimento de onda e direção em que estão sendo emitidas. Plantas percebem a luz através de fotorreceptores, como os fitocromos e criptocromos, e respondem a esses receptores gerando uma série de respostas fisiológicas específicas (MUNEER et al., 2014). Segundo Dong et al. (2014) e Samuolienė et al. (2013) o grande desafio da cultura de tecidos é fornecer de maneira controlada intensidades de luz em quantidade e qualidade suficientes para o desenvolvimento das plantas. Diodos de emissão de luz (LED) têm sido propostos como fonte luminosa para ambientes controlados em instalações agrícolas ou em câmaras de crescimento de plantas. Eles apresentam características desejáveis, como a capacidade de controlar a composição espectral, longa durabilidade, capacidade de emitir comprimentos de onda específicos, superfícies de emissão relativamente frias, além de apresentarem um tamanho reduzido, o que facilita manejo e instalação nas câmaras de crescimento (LI et al., 2010; MUNEER et al., 2014).

O desenvolvimento e a fisiologia das plantas são fortemente influenciados pelo espectro de luz do ambiente proporcionado pelos LEDs, dentre as quais podemos citar o da luz azul, vermelha, verde e combinações. O espectro de luz azul, por exemplo, está envolvido em vários processos fisiológicos da planta, como o fototropismo, morfogênese, abertura de estômatos e funcionamento fotossintético das folhas (WHITELAM; HALLIDAY, 2007). Enquanto as lâmpadas de LED vermelhas emitem um espectro de luz muito próximo do máximo de absorvância, tanto da clorofila quanto dos fitocromos. Em contrapartida, a lâmpada de LED verde, de maneira geral, promove a redução fotossintética em plantas *in vitro*, onde vários estudos em que foram avaliadas a eficiência e deficiência de luz verde sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas comprovaram esse fato (SUN et al., 1998). Estima-se que a absorção pelas plantas da luz azul e vermelha, emitidas por lâmpadas LED, gira em torno de 90% da luz emitida, e indica que o desenvolvimento das plantas e a sua fisiologia é fortemente influenciado por essas cores e comprimentos de onda específicos. Todavia, essa influência na fisiologia vegetal desempenhada pelos espectros de luz varia entre as espécies, refletindo na produção vegetal. Estudos realizados com *Vaccinium corymbosum* revelaram que a luz monocromática azul estimulou altos níveis de clorofilas nas folhas, enquanto o cultivo sob LED vermelho, inibiu o acúmulo de clorofila, porém,

produziram ramos e raízes mais longos e proporcionaram altas porcentagens de brotos laterais no cultivo *in vitro* (HUNG et al., 2016). Enquanto que para a *Stevia rebaudiana* cultivada *in vitro*, a combinação de espectros vermelho e azul produziram brotações maiores em comparação às cultivadas sob os comprimentos de onda monocromáticos (RAMIREZ-MOSQUEDA et al., 2016).

Em virtude dos avanços no cultivo *in vitro* e na utilização satisfatória das lâmpadas de LEDs, objetivou-se demonstrar os efeitos da utilização de lâmpadas LEDs no cultivo *in vitro* de plantas cultivadas. Além disso, essa revisão propõe expor alguns efeitos do uso de LEDs na fisiologia e no desenvolvimento vegetal.

DESENVOLVIMENTO

Tecnologias utilizadas na agricultura

As tecnologias agrícolas, em seu sentido mais amplo, tem sido as responsáveis por apoiar a humanidade, seu crescimento populacional e suas complexidades no decorrer do tempo. Na verdade, a capacidade de satisfazer as necessidades alimentares básicas do mundo, com o crescimento contínuo da população é atribuível ao desenvolvimento de tecnologias agrícolas cada vez mais sofisticadas. Alguns dos maiores avanços na produtividade das culturas agrícolas envolvem a integração de novas práticas agrícolas com o melhoramento genético (BENNETT et al., 2013). O melhoramento genético já ocorria desde os primórdios da humanidade, quando os homens primitivos selecionavam plantas mais vigorosas e mais produtivas para o plantio. O homem foi o responsável pela domesticação de milhares de espécies vegetais, entre elas o arroz, milho, cevada, sorgo, tubérculos, leguminosas e frutíferas (BRAMMER, 2002). A engenharia genética ou tecnologia do DNA recombinante, juntamente com a genômica, ficaram conhecidas como biotecnologia moderna, marcando um novo estágio para a agricultura, onde a principal contribuição para a agricultura foi a possibilidade de criar novas espécies, combinando genes entre duas espécies distintas, visando o desenvolvimento de plantas com interesse econômico (SILVEIRA et al., 2005).

A conservação de material genético em bancos de germoplasma de espécies com alto valor comercial, seja ele ornamental, consumo ou farmacológico, é importante pois preserva a variabilidade genética e permitem o estudo de suas propriedades em ambiente controlado. Uma das tecnologias utilizadas para isso é a criopreservação, que consiste no armazenamento do material biológico vivo em nitrogênio líquido a ultrabaixas temperaturas, promovendo a paralisação do metabolismo celular (DE FARIA et al., 2017). Teoricamente, o material vegetal pode manter-se conservado sob baixas temperaturas por um período indefinido de tempo, preservando a estabilidade genética (ALBUQUERQUE et al., 2016).

Existem várias aplicações importantes da biotecnologia e biologia molecular visando a melhoria no desempenho das culturas, incluindo a seleção assistida por marcadores, a propagação *in vitro* de plantas e resgate de embriões através da micropropagação, entre outras (MCCALLUM et al., 2000). A totipotência das células

vegetais permite que elas sejam prontamente utilizadas para a propagação *in vitro* ou desenvolvimento de cultura de células. Os trabalhos com cultura de células vegetais iniciaram no início do século 20, onde a partir daí, foram estabelecidas uma série de técnicas e metodologias utilizadas no processo, através do conhecimento adquirido com o passar dos anos (DAVIES; DEROLLES, 2014).

A cultura de células, protoplastos e tecidos é uma das áreas mais bem-sucedidas no ramo da biotecnologia. A manipulação de células e componentes celulares, manipulação de tecidos, produção rápida de mudas e em larga-escala e a adoção de técnicas para o melhoramento de plantas são apenas alguns exemplos das muitas áreas importantes na cultura de tecidos. Avanços no conhecimento da fisiologia do crescimento e desenvolvimento *in vitro* tem levado a otimização de métodos para acelerar e melhorar o desenvolvimento de plantas (PASQUAL et al., 2014). A aplicação de técnicas de cultura de tecidos em fruteiras do cerrado, por exemplo, pode minimizar problemas de perda de material genético pela destruição do cerrado, através da multiplicação sistematizada de plantas (PINHAL et al., 2011). Além disso, técnicas de cultura de tecidos foram eficientes para a conversão de embriões somáticos cotiledonares em plântulas de *Coffea arabica* sem a utilização de reguladores de crescimento (DE REZENDE et al., 2011). Pasqual et al. (2014) relataram que a aplicação de métodos de cultura de tecidos no melhoramento genético de plantas facilita o desenvolvimento de espécies que se mostrem mais adaptadas a condições de estresse bióticas e abióticas, permitindo pressão de seleção no próprio ambiente de cultivo e economia de tempo e espaço para o melhorista.

Fontes de luz para as plantas

Câmaras de crescimento, com ambiente controlado, são usadas extensivamente para estudar a fisiologia das plantas (BULA et al., 1991). Embora salas de crescimento tenham sido utilizadas para produção de mudas em escala comercial há algum tempo, os benefícios do ambiente controlado também vêm sendo utilizado para a produção de culturas comerciais (DAVIS, 1985).

Para as plantas autotróficas, a faixa de energia radiante, definida como radiação fotossinteticamente ativa (PAR), está entre 400 e 700 nm, e é o maior fator ambiental que controla o seu crescimento e desenvolvimento. O espectro da fonte de radiação deve atender as exigências da planta para a fotossíntese e o desenvolvimento fotomorfogênico (BULA et al., 1991). A importância da luz para o desenvolvimento das plantas está bem estabelecida atualmente. Sabe-se que a intensidade da luz, comprimento de onda (qualidade da luz) e o fotoperíodo regulam o crescimento, diferenciação, morfogênese de células e a cultura de tecidos (SILVA et al., 2014).

As fontes de radiação mais comumente utilizadas em ambientes controlados de crescimento de plantas são as lâmpadas fluorescentes, iodetos metálicos, sódio em alta pressão, e lâmpadas incandescentes. Essas lâmpadas comercialmente disponíveis foram desenvolvidas para aplicações em iluminação de ambientes humanos. Uma

vez que os fotorreceptores de plantas diferem dos seres humanos, as fontes de luz utilizadas atualmente nas instalações de cultivo de plantas apresentam várias limitações e, conseqüentemente, não são uma fonte de radiação ideal (BULA et al., 1991). Porém, lâmpadas fluorescentes emitem um amplo espectro luminoso que varia de 350 a 750 nm, incluindo comprimentos de onda desnecessários e que são de baixa qualidade para promover o crescimento vegetal (RAMIREZ-MOSQUEDA et al., 2016).

O balanço espectral da fonte, não só afeta a eficiência fotossintética como também tem um impacto significativo na manutenção do balanço térmico na câmara de crescimento e sobre as plantas (BULA et al., 1991). Diferentes tipos de lâmpadas fornecem variadas proporções de fluxo radiante na região fotossinteticamente ativa e regiões espectrais do infravermelho (BUBENHEIM et al., 1988). Fontes de radiação com maior eficiência elétrica e capaz de gerar uma maior eficiência fotossintética seria um benefício significativo em termos de pesquisa e aplicações em produção de culturas comerciais.

Sistemas de irradiação baseados em diodos de emissão de luz, ou seja, lâmpadas LED, tem sido descrito e utilizado com esse propósito em ambientes de crescimento controlado em virtude dos benefícios que podem trazer para as plantas e para o cultivo protegido (IGNATIUS et al., 1991). As vantagens das lâmpadas LED, incluem tamanho reduzido, comprimento de onda específico, intensidade e qualidade de luz ajustáveis, bem como alta eficiência de conversão fotoelétrica. Tais vantagens tornam as lâmpadas LEDs perfeitas para suportar o crescimento de plantas em ambientes controlados (YEH; CHUNG, 2009).

Diodos de emissão de luz (lâmpadas LEDs)

Para superar as desvantagens das lâmpadas fluorescentes no cultivo *in vitro*, desenvolveram os diodos de emissão de luz (LEDs). Estes apresentam a emissão de comprimento de onda e intensidade de luz controláveis, distribuição de energia espacial e polarização (SILVA et al., 2014). Lâmpadas LEDs são um tipo único de diodo semicondutor, e podem ter um pico de emissão de luz variando de 220 a 1.000 nm, e é o primeiro dispositivo que tem a capacidade de controle espectral, permitindo que os comprimentos de onda sejam adaptados aos fotorreceptores dos vegetais, influenciando de maneira satisfatória a morfologia e composição das plantas (OLLE; VIRSILÈ, 2013).

Nos primeiros trabalhos com lâmpadas LEDs para plantas foram utilizadas lâmpadas LED vermelhas de dispositivos individuais lensed. Nessa época, somente os dispositivos vermelhos (aproximadamente 660 nm) foram ajustados para o crescimento das plantas. Lâmpadas desses dispositivos não eram viáveis para utilização em larga escala, pois tinham custo elevado, desempenho irregular dos dispositivos individuais e dificuldades na fabricação (ONO; WATANABE, 2006). Com o passar do tempo, novas tecnologias de chips de lâmpadas LEDs tornaram-se disponíveis, onde a partir daí foram desenvolvidos módulos de LED com alta densidade e mais eficientes que os anteriores. Essa tecnologia é muito cara para utilização

em larga escala, mas é ideal para aplicação em pesquisas especializadas e no cultivo protegido que requerem alta incidência luminosa em vários espectros diferentes, independentes e controláveis (MORROW, 2008).

As lâmpadas LEDs oferecem vantagens sobre as formas de iluminação tradicionais utilizadas na agricultura convencional. Essas vantagens são: tamanho reduzido, durabilidade, longo tempo de vida, são lâmpadas frias e possuem a opção de selecionar os comprimentos de onda específicos para obter uma resposta desejável na planta. Por esses motivos as lâmpadas LEDs são mais adequadas para utilização do que outras fontes luminosas (MASSA et al., 2008). Bula et al. (1991) foram os primeiros a sugerir a utilização de lâmpadas LEDs para o crescimento de plantas e relataram que o crescimento de alface sob luz vermelha suplementada com luz azul fluorescente era equivalente ao encontrado sob lâmpada fluorescente branca mais lâmpadas incandescentes. Nesse mesmo estudo, as lâmpadas azuis não foram amplamente disponíveis para as plantas, elas serviram como alternativa luminosa (MASSA et al., 2008). Testes subsequentes realizados por esse mesmo grupo mostrou que hipocótilos e cotilédones de mudas de alface sob luz vermelha, tornaram-se alongadas, e que esse efeito poderia ser evitado pela adição de luz azul durante o seu desenvolvimento (HOENECKE et al., 1992).

O potencial de lâmpadas LEDs para utilização em cultivos de plantas continuou então a ser estudado e comparações da incidência de luz vermelha em *Pueraria lobata* mostraram que as folhas apresentaram pequenas diferenças na condutância estomática, mas semelhantes respostas fotossintéticas (TENNESSEN et al., 1994). Comparações de taxas fotossintéticas de folhas de morango (*Fragaria ananassa*) em lâmpadas LED vermelha (660 nm) ou azul (450 nm), mostraram alta eficiência quântica nos tratamentos sob luz vermelha (YANAGI et al., 1996a). Estudos mostram que plantas de arroz cultivadas sob uma combinação de lâmpadas LEDs vermelho (660 nm) e azul (470 nm) sustentaram taxas fotossintéticas mais elevadas do que folhas de plantas cultivadas sob lâmpadas LEDs vermelha monocromática (MATSUDA et al., 2004).

As lâmpadas LEDs oferecem muitas vantagens como fontes de radiação para as plantas, mas existem dificuldades que retardam a sua implementação para aplicações no cultivo de plantas. A dificuldade primária é o custo. Aplicações de fontes de radiação para plantas requerem um grande número de dispositivos em um sistema de iluminação controlável. Felizmente, a evolução histórica e desempenho das lâmpadas LEDs no decorrer do tempo, tem feito com que os preços reduzam cada vez mais (MASSA et al., 2008). Além disso, sua eficiência na produção vegetal associada às suas diferentes vantagens sobre as lâmpadas convencionais fazem com que seu custo seja compensatório.

Led azul

Existe uma variação muito grande de respostas fisiológicas da planta a luz azul (400 – 500 nm), que são traduzidos em processos elétricos, metabólicos e genéticos

que promovem alterações no crescimento e desenvolvimento, a fim de permitirem adaptações das plantas às mudanças nas condições ambientais. A absorção da luz azul pelas clorofilas promove um estado energético maior do que em relação à luz vermelha devido à maior energia existente na luz azul (TAIZ; ZEIGER, 2013). Essa energia de excitação da molécula de clorofila pode ser utilizada na etapa fotoquímica, ser perdida na forma de calor ou mesmo gerar danos ao aparato fotossintético como a formação de radicais livres azul (TAIZ; ZEIGER, 2013). Assim, a quantidade de luz azul exigida ou ótima pelas diferentes espécies de plantas é uma constante pergunta feita pelos pesquisadores (MASSA et al., 2008).

A luz azul possui um papel crucial nas relações hídricas e trocas gasosas, e consequentemente no crescimento e produção vegetal (BLAAUW; BLAAUW-JANSEN, 1970; COSGROVE, 1981). Além disso, ela exerce uma influência positiva e coordenada no genoma da planta e no plastídeo, que influencia o desenvolvimento de cloroplastos nas células das plantas e a síntese de clorofila (AKOYUNOGLU; ANNI, 1984; RICHTER; WESSEL, 1985).

Todavia, para algumas espécies como *Rehmania glutinosa* (MANIVANNAN et al., 2015), *Plectranthus amboinicus* (NOGUCHI; AMAKI, 2016), *Solanum lycopersicum*, *Cucumis sativus* e *Capsicum annum* (SNOWDEN et al., 2016), verificou-se uma redução do crescimento quando as plantas se desenvolviam sob LED azul. Desta forma, tem surgido a necessidade de estudos que visem a combinação de LEDs para a obtenção de um crescimento eficiente nas plantas (HOENECKE et al., 1992). Plântulas de trigo germinadas sob luz LED vermelho não conseguiram desenvolver clorofila de maneira adequada, porém, a suplementação com luz LED azul restaurou a síntese adequada de clorofila nas plantas (TRIPATHY; BROWN, 1995). Goins et al. (1997) utilizaram lâmpadas LEDs como única fonte de luz para plantas de trigo cultivadas em câmaras de crescimento e compararam somente luz vermelha, vermelho com 1% de luz azul e vermelho com 10% de luz azul com lâmpadas fluorescentes comuns. Os resultados encontrados demonstraram que as plantas cultivadas somente sob luz vermelha foram capazes de completar o seu ciclo, porém, quando a luz azul foi adicionada, as plantas produzidas foram maiores e com maior número de sementes. Desta forma, a eficiência desempenhada pela luz azul na produção de plantas cultivadas varia entre as espécies, sendo necessária, muitas vezes, uma combinação de espectros de luz.

Led vermelha

A lâmpada LED vermelha emite um espectro luminoso estreito (660 nm) que é muito próximo à máxima absorvância para a clorofila e fitocromos (MUNEER et al., 2014). A luz vermelha é a que exerce maior influência na fotomorfogênese e o fitocromo é o fotorreceptor responsável pela absorção desse espectro. Esse fotorreceptor ocorre em duas formas fotoconversíveis, uma que absorve a luz vermelha (forma ativa), e outra que absorve a luz vermelho distante (forma inativa).

Entretanto, os espectros de absorção dessas duas formas sobrepõem-se na região espectral do vermelho, permitindo um equilíbrio entre essas duas formas (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Embora os LEDs vermelhos tenham um grande potencial como fonte luminosa para conduzir a fotossíntese, as plantas são adaptadas a utilizar um amplo espectro de luz para controlar as respostas fotomorfogênicas (KEODRICK; KRONENBERG, 1994). Tanto a luz vermelha, via fitocromo, e a luz azul, via fotorreceptores, são efetivas na indução de respostas fotomorfogênicas. Portanto, o crescimento, desenvolvimento e produção de sementes de diferentes espécies de plantas em crescimento sob comprimentos de ondas específicos, devem ser muito bem caracterizados e entendidos antes da adoção do LED vermelha como fonte alternativa luminosa para o crescimento de plantas em ambientes controlados (GOINS et al., 1997).

As plantas terrestres evoluíram sob um largo espectro de luz, fato que tem uma importância crucial para determinar se as lâmpadas LEDs vermelhas serão utilizadas sozinhas ou combinadas com outros comprimentos de onda para suportar um crescimento e desenvolvimento normal de plantas (BROWN et al., 1995). Foi observado aumento do crescimento de plantas cultivadas *in vitro* proporcionado pela luz vermelha, sendo também observado para outras espécies: *Vaccinium corymbosum* (HUNG et al., 2016) e *Scrophularia takesimensis* (JEONG; SIVANESAN, 2015), *Oncidium* spp. (CHUNG et al., 2010) e *Plectranthus amboinicus* (SILVA et al., 2017). Porém, em estudo realizado por Goins et al. (1997), houve baixo acúmulo de matéria seca em plantas de *Triticum* spp. cultivadas somente sob luz vermelha. Segundo os autores, este fato pode estar relacionado com uma baixa taxa de assimilação de CO₂, onde as folhas das plantas cultivadas sob essas condições apresentaram uma menor taxa de fotossíntese líquida.

Em outro estudo, que comparou os efeitos de lâmpadas LEDs vermelhas com lâmpadas brancas no crescimento de plantas de *Pueraria phaseoloides*, a taxa fotossintética foi melhor sob luz LED vermelha em baixa intensidade de fótons, porém, foi um pouco menor em intensidades altas de fótons e foram iguais com relação à saturação dos níveis de CO₂ (TENNESSEN et al., 1994). Os baixos índices nas taxas fotossintéticas de plantas em crescimento somente sob luz vermelha, pode estar associado com a baixa condutância dos estômatos, pois, estudos mostram que a luz azul influencia muito mais essa atividade estomática do que a luz vermelha (SHARKEY; RASCHKE, 1981; ZEIGER, 1984). Goins et al. (1997) relataram que a condutância estomática aumentou a medida que os níveis de luz azul foram aumentando, o que sugere que a baixa atividade estomática contribuiu para os baixos índices de taxas fotossintéticas encontrados em plantas que cresceram somente sob luz vermelha.

Rendimentos ótimos para outras espécies de plantas em crescimento sob LED vermelho foram obtidos com a suplementação de radiação azul (BULA et al., 1991; HOENECKE et al., 1992; BROWN et al., 1995). Schuerger et al. (1997) examinaram mudanças na anatomia

de folhas de *Capsicum annuum* sob diferentes combinações de cores de luz, utilizando o vermelho combinado com infravermelho (735 nm) e com LED azul, comparados com o tratamento controle. Os resultados indicaram que a espessura da folha e o número de cloroplastos por célula, eram muito mais dependentes do nível de luz azul do que da relação na combinação do vermelho com o infravermelho. Portanto, os estudos indicam que as lâmpadas de LED vermelhas podem ser eficientes na otimização da fotossíntese, para aumentar a altura da parte aérea, comprimentos dos entrenós e frequência de enraizamento, porém, a luz azul pode ser necessária para a síntese de clorofila, desenvolvimento e atividade dos estômatos (POUDEL et al., 2008).

De maneira geral, o uso de espectros na região do azul e vermelho pode ser uma proposta para maior eficiência no desenvolvimento de plantas cultivadas. Entretanto, são necessários estudos que contemplem essas repostas, pois são muito dependentes da espécie a ser cultivada.

Led verde

A clorofila absorve luz principalmente nos espectros vermelho e azul, de forma que apenas uma parte da luz enriquecida nos comprimentos de onda do verde (500 – 580 nm) é refletida para o olho humano, fazendo com que a clorofila seja percebida na coloração verde (TAIZ; ZEIGER, 2013). Estudos demonstram que existe uma influência da luz verde na abertura de estômatos através de dois caminhos: através da absorção no complexo antena, de maneira semelhante a da luz vermelha, e através da absorção em receptores de luz fora do aparelho fotossintético. A luz verde também afeta na ação da luz azul, inibindo ou pelo menos diminuindo seus efeitos (AASAMAA; APHALO, 2016). Esse efeito de reversão da luz verde sobre os efeitos da luz azul, principalmente sobre a abertura de estômatos, pode ser uma adaptação ecológica para evitar perda excessiva de água foliar pelos estômatos em ambientes sombreados, que são ricos nesse espectro de luz na região do verde, pois o potencial fotossintético é pequeno nesses locais (TALLBOT et al., 2006).

A luz verde foi por muito tempo desconsiderada no crescimento de plantas pelo fato dos pigmentos em sua maioria refletirem esse comprimento de onda, porém, alguns estudos utilizando LEDs vermelho e azul isolado ou em combinação verificaram que o crescimento das plantas era melhor no LED branco. A partir de estudos, verificaram que essa melhoria no crescimento era devido a presença de espectro de luz verde presente no LED branco (KIM et al., 2004; MASSA et al., 2008). Kim et al. (2004) trabalhando com *Lactuca sativa* demonstraram que as plantas cultivadas com luz vermelha, azul e no máximo 24% de luz verde, apresentaram maior peso de matéria fresca e seca, e maior área foliar do que as cultivadas com 51% de incidência de luz verde, ou somente vermelho e azul.

A relevância das respostas a luz verde é baseada na suposição de que existem situações na natureza que a planta pode encontrar condições aumentadas de radiação

verde no seu ambiente de crescimento, fato bem comum em ambientes naturais. Quando a radiação incide sob as folhas das plantas promove uma diminuição no fluxo radiante e um deslocamento da relação do comprimento de onda visível para o infravermelho. Esse deslocamento altera a relação de luz azul/vermelha para a luz verde, pois o verde é facilmente refletido pelas plantas e transmitido entre os seus tecidos (FOLTA; MARUHNICH, 2007). Portanto, a luz verde é eficientemente transmitida entre os tecidos das plantas, podendo exercer um papel mais crucial na fotossíntese do que a luz azul e vermelha, em alguns tecidos que não estão diretamente expostos à luz ambiente (SUN et al., 1998). Apesar dos comprimentos de onda na região do azul e vermelho serem mais eficazes para promover a fotossíntese, estudos relatam que o espectro verde pode penetrar mais eficientemente nas folhas e aumentar a fixação de carbono, principalmente em ambientes sombreados (WANG; FOLTA, 2013).

Kim et al. (2006) resumiram os experimentos com a suplementação da luz verde em lâmpadas LED azul e vermelha, e concluíram que incidência de luz verde maior que 50% provoca redução no crescimento de plantas, enquanto combinações incluindo incidência de até 24% de luz verde melhoraram o crescimento em algumas espécies vegetais. Potenciais efeitos de luz verde, podem variar em função do contexto do desenvolvimento, por exemplo, plântulas recém emergidas do solo apresentam quantidades insignificantes de clorofila, portanto, a absorção de luz verde é semelhante a absorção da luz azul, vermelha e infravermelha (FOLTA; MARUHNICH, 2007). Além disso, o efeito da luz verde na fisiologia das plantas irá depender do tamanho do espectro necessário para a espécie.

Led branco

Uma outra alternativa à lâmpada fluorescente, é a luz LED branca (460 – 560 nm) que apresenta uma maior proporção de luz azul e verde e uma menor proporção de UV no espectro e relação vermelho: vermelho distante menor em comparação às lâmpadas fluorescentes (FRASZCZAK et al., 2014). A adição de luz LED branca nos cultivos pode aumentar o crescimento das plantas, pois permite que a luz penetre melhor nas folhas, para ser utilizada na fotossíntese, do que as luzes monocromáticas azul e vermelha, como observado para *Lactuca sativa* hidropônica (LIN et al., 2013). Os LEDs brancos podem ser obtidos pela combinação de diferentes chips de LEDs coloridos, ou através do revestimento de chips de LED azul com uma camada de fósforo convertido (SCHULZE et al., 2014). Essa proporção do espectro azul na lâmpada LED branca, pode variar e essas parecem afetar a morfogênese das plantas. Cope e Bugbee (2013), avaliando o efeito no crescimento e desenvolvimento de três tipos LEDs brancos, com 11, 19 e 28% de luz azul, em *Raphanus sativus*, *Glycine max* e *Triticum spp.*, encontraram que lâmpadas LED brancas com 11% de luz azul promoveram aumento na altura das plantas, e aquelas com 28% de luz azul resultou em plantas mais compactas. Esses estudos evidenciam que as plantas necessitam de amplo espectro luminoso para otimizar os processos

fotossintéticos, e essa necessidade varia com a espécie vegetal.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o avanço das tecnologias, as características e o desempenho das lâmpadas LEDs como fontes de radiação para as plantas tendem a melhorar cada vez mais. Aspectos como efeito do comprimento de onda sobre a produtividade da planta, o ângulo de dispersão dos fótons para uma incidência uniforme dos fótons e a irradiância na superfície de crescimento da planta precisam ser melhor estudados. Espera-se que ocorram melhorias na conversão de energia elétrica em radiação emitida pelos LEDs para otimizar os índices de radiação incidentes nas plantas com o decorrer dos avanços das tecnologias. Além disso, é necessário um incentivo maior nos estudos entre as espécies cultivadas e o uso dos LEDs para o melhor ajuste de tecnologias. Visto que a utilização dessas lâmpadas tem promovido eficiências em vários aspectos fisiológicos das plantas cultivadas. Porém, essa eficiência varia entre os espectros de luz e as espécies. Assim, os avanços na utilização dos LEDs no cultivo protegido de plantas cultivadas estão atrelados às respostas fisiológicas específicas de cada espécie.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASAMAA, K.; APHALO, P.J. Effect of vegetational shade and its components on stomatal responses to red, blue and green light in two deciduous tree species with different shade tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, Elmsford, v.121, p.94-101, 2016.
- AKOYUNOGLU, G.; ANNI, H. Blue light effect on chloroplast development in higher plants. In: **Blue light effects in biological systems**. Berlin, Springer Berlin Heidelberg, 1984. p.397-406.
- ALBUQUERQUE, E.; DA COSTA SANTOS, D.; NETO, J.J.daS.B. Crioarmazenagem de sementes de manga (*Mangifera indica* L.). **A Barriguda: Revista Científica**, Campina Grande, v.6, n.1, p.1-10, 2016.
- BENNETT, A.B. et al. Agricultural biotechnology: economics, environment, ethics, and the future. **Annual Review of Environment and Resources**, Palo Alto, v.38, p.249-279, 2013.
- BLAAUW, O.H.; BLAAUW-JANSEN, G. Third positive (c-type) phototropism in the *Avena coleoptile*. *Acta Botanica Neerlandica*, Oxford, v.19, n.5, p.764-776, 1970.
- BRAMMER, S.P. **Variabilidade e diversidade genética vegetal: requisito fundamental em um programa de melhoramento**. Espumoso, Embrapa Trigo, 2002.
- BROWN, C.S.; SCHUERGER, A.C.; SAGER, J.C. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Virginia, v.120, n.5, p.808-813, 1995.
- BUBENHEIM, D.L.; BUGBEE, B.; SALISBURY, F.B. Radiation in controlled environments: influence of lamp type and filter material. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. **American Society for Horticultural Science**, Virginia, v.113, n.3, p.468-474, 1988.
- BULA, R.J. et al. Light-emitting diodes as a radiation source for plants. **HortScience**, Virginia, v.26, n.2, p.203-205, 1991.
- CHUNG, J.P.; HUANG, C.Y.; DAI, T.E. Spectral effects on embryogenesis and plantlet growth of *Oncidium* 'Gower Ramsey'. *Scientia Horticulturae*, Amsterdam, v.124, n.4, p.511-516, 2010.
- COPE, K.R.; BUGBEE, B. Spectral effects of three types of white light-emitting diodes on plant growth and development: absolute versus relative amounts of blue light. **HortScience**, Virginia, v.48, n.4, p.504-509, 2013.
- COSGROVE, D.J. Rapid suppression of growth by blue light occurrence, time course, and general characteristics. **Plant Physiology**, Lancaster, v.67, n.3, p.584-590, 1981.

- DAVIES, K.M.; DEROLES, S.C. Prospects for the use of plant cell cultures in food biotechnology. **Current Opinion in Biotechnology**, London, v.26, p.133-140, 2014.
- DAVIS, N. Controlled environment agriculture - Past, present, and future. **Food Technology**, Chicago, v.39, p.124-126, 1985.
- DE FARIA, C.V.N. et al. Criopreservação de sementes de *Physalis angulata* L. por meio da desidratação em sílica gel. **Plant Cell Culture & Micropropagation**, Recife, v.12, n.2, p.27, 2017.
- DE REZENDE, J.C. et al. Influência de auxina e citocinina no desenvolvimento de embriões somáticos de *Coffea arabica* L. **Plant Cell Culture & Micropropagation**, Recife, v.7, n.1, p.1-8, 2016.
- DONG, C. et al. Low light intensity effects on the growth, photosynthetic characteristics, antioxidant capacity, yield and quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) at different growth stages in BLSS. **Advances in Space Research**, Saint-Mandé, v.53, n.11, p.1557-1566, 2014.
- FOLTA, K.M.; MARUHNICH, S.A. Green light: a signal to slow down or stop. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.58, n.12, p.3099-3111, 2007.
- FRAŚCZAK, B. et al. Growth rate of sweet basil and lemon balm plants grown under fluorescent lamps and led modules. **Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus**, Lublin, v.13, n.2, p.3-13, 2014.
- GOINS, G.D. et al. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.48, n.7, p.1407-1413, 1997.
- HOENECKE, M.E.; BULA, R.J.; TIBBITTS, T.W. Importance of Blue/Photon levels for *Lettuce* seedlings grown under red-light-emitting diodes. **HortScience**, Virginia, v.27, n.5, p.427-430, 1992.
- HUNG, C.D. et al. LED light for *in vitro* and *ex vitro* efficient growth of economically important highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). **Acta Physiologiae Plantarum**, Krakow, v.38, n.6, p.1-9, 2016.
- IGNATIUS, R.W. et al. **Method and apparatus for irradiation of plants using optoelectronic devices**. U.S. Patent n.5,012,609, 07 mai. 1991.
- JEONG, B.R.; SIVANESAN, I. Direct adventitious shoot regeneration, *in vitro* flowering, fruiting, secondary metabolite content and antioxidant activity of *Scrophularia takesimensis* Nakai. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, London, v.123, n.3, p.607-618, 2015.
- KEODRICK, R.E.; KRONENBERG, G.H.M. **Photomorphogenesis in plants**. 2.nd edn. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- KIM, H.H. et al. Comparison of growth and photosynthetic characteristics of lettuce grown under red and blue light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental green LEDs. **Acta Horticulturae**, Leuven, v.659, p.467-475, 2004.
- KIM, H.H. et al. Evaluation of lettuce growth using supplemental green light with red and blue light-emitting diodes in a controlled environment-a review of research at Kennedy Space Center. In: **V INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ARTIFICIAL LIGHTING IN HORTICULTURE**, 711., 2005, Lillehammer. p.111-120.
- LI, H.; XU, Z.; TANG, C. Effect of light-emitting diodes on growth and morphogenesis of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plantlets *in vitro*. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, London, v.103, n.2, p.155-163, 2010.
- LIN, K.H. et al. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*). **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v.150, p.86-91, 2013.
- MANIVANNAN, A. et al. Blue LED light enhances growth, phytochemical contents, and antioxidant enzyme activities of *Rehmannia glutinosa* cultured *in vitro*. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, Seul, v.56, n.1, p.105-113, 2015.
- MASSA, G.D. et al. Plant productivity in response to LED lighting. **HortScience**, Virginia, v.43, n.7, p.1951-1956, 2008.
- MATSUDA, R. et al. Photosynthetic characteristics of rice leaves grown under red light with or without supplemental blue light. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v.45, n.12, p.1870-1874, 2004.
- MCCALLUM, C.M. et al. Targeting induced locallesions in genomes (TILLING) for plant functional genomics. **Plant Physiology**, Lancaster, v.123, n.2, p.439-442, 2000.
- MIGUEL, C.; MARUM, L. An epigenetic view of plant cells cultured *in vitro*: somaclonal variation and beyond. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.62, n.11, p.3713-3725, 2011.
- MORROW, R.C. LED lighting in horticulture. **HortScience**, Virginia, v.43, n.7, p.1947-1950, 2008.
- MUNEER, S. et al. Influence of green, red and blue light emitting diodes on multiprotein complex proteins and photosynthetic activity under different light intensities in lettuce leaves (*Lactuca sativa* L.). **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v.15, n.3, p.4657-4670, 2014.
- NOGUCHI, A.; AMAKI, W. Effects of light quality on the growth and essential oil production in Mexican mint. In: **VIII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHT IN HORTICULTURE**, 1134., 2016, East Lansing. p.239-244.
- OLLE, M.; VIRŠILE, A. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. **Agricultural and Food Science**, Hameenlinna, v.22, n.2, p.223-234, 2013.
- ONO, E.; WATANABE, H. Plant factories blossom: production in Japan steadily flowers. **Resource: Engineering & Technology for a Sustainable World**, v.13, p.13-14, 2006.
- PASQUAL, M.; SOARES, J.D.R.; RODRIGUES, F.A. **Biotechnology and plant breeding**. BOREM, A.; FRITSCHÉ-NETO, R. (Eds.). San Diego: Academic Press, Cambridge, 2014. p.157-178.
- PENÁ-RAMÍREZ, Y. et al. Tissue culture methods for the clonal propagation and genetic improvement of Spanish red cedar (*Cedrela odorata*). **Plant Cell Culture Protocols**, Mérida, p.129-141, 2012.
- PINHAL, H.F. et al. Aplicações da cultura de tecidos vegetais em fruteiras do Cerrado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.7, p.1136-1142, 2011.
- POUDEL, P.R.; KATAOKA, I.; MOCHIOKA, R. Effect of red-and blue-light-emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, London, v.92, n.2, p.147-153, 2008.
- RAMÍREZ-MOSQUEDA, M.A.; IGLESIAS-ANDREU, L.G.; BAUTISTA-AGUILAR, J.R. The effect of light quality on growth and development of *in vitro* plantlet of *Stevia rebaudiana* Bertoni. **Sugar Tech**, Jankipuram, p.1-6, 2016.
- RICHTER, G.; WESSEL, K. Red light inhibits blue light-induced chloroplast development in cultured plant cells at the mRNA level. **Plant Molecular Biology**, Zurich, v.5, n.3, p.175-182, 1985.
- ROBERT, M.L. et al. **Micropropagation of Agave spp.** In: **High-Tech and micropropagation III**. Berlin, Heidelberg, 1992. p.306-329.
- SAMUOLIENĖ, G. et al. LED irradiance level affects growth and nutritional quality of *Brassica microgreens*. **Central European Journal of Biology**, Szczecin, v.8, n.12, p.1241-1249, 2013.
- SCHUERGER, A.C.; BROWN, C.S.; STRYJEWSKI, E.C. Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annum* L.) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light. **Annals of Botany**, Oxford, v.79, n.3, p.273-282, 1997.
- SCHULZE, P.S.C. et al. Light emitting diodes (LEDs) applied to microalgal production. **Trends in Biotechnology**, Boston, v.32, n.8, p.422-430, 2014.
- SHARKEY, T.D.; RASCHKE, K. Effect of light quality on stomatal opening in leaves of *Xanthium strumarium* L. **Plant Physiology**, Glasgow, v.68, n.5, p.1170-1174, 1981.
- SILVA, M.M.A.; et al. Effect of blue/red LED light combination on growth and morphogenesis of *Saccharum officinarum* plantlets *in vitro*. In: **SPIE BIOS, International Society for Optics and Photonics**, San Francisco, 2014. p.89471X-89471X-8.
- SILVA, S.T. et al. Effect of light and natural ventilation systems on the growth parameters and carvacrol content in the *in vitro* cultures of *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, London, p.1-10, 2017.
- SILVEIRA, J.M.F.J.da; BORGES, I.deC.; BUAINAIN, A.M. **Biotechnologia e agricultura: da ciência e tecnologia aos impactos da inovação. São Paulo em Perspectiva**, São Paulo, v.19, n.2, p.101-114, 2005.
- SNOWDEN, M.C.; COPE, K.R.; BUGBEE, B. Sensitivity of seven diverse species to blue and green light: Interactions with photon flux. **PLoSone**, San Francisco, v.11, n.10, p.e0163121, 2016.
- SUN, J.; NISHIO, J.N.; VOGELMANN, T.C. Green light drives CO₂ fixation deep within leaves. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v.39, n.10, p.1020-1026, 1998.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Editora Artmed, 2013.
- TALBOTT, L.D. et al. Reversal by green light of blue light-stimulated stomatal opening in intact, attached leaves of *Arabidopsis operates* only in the potassium-dependent, morning phase of movement. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v.47, n.3, p.332-339, 2006.

- TENNESSEN, D.J.; SINGSAAS, E.L.; SHARKEY, T.D. Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research. **Photosynthesis Research**, Baton Rouge, v.39, n.1, p.85-92, 1994.
- TRIPATHY, B.C.; BROWN, C.S. Root-shoot interaction in the greening of wheat seedlings grown under red light. **Plant Physiology**, Lancaster, v.107, n.2, p.407-411, 1995.
- US-CAMAS, R. et al. *In vitro* culture: an epigenetic challenge for plants. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, London, v.118, n.2, p.187-201, 2014.
- WANG, Y.; FOLTA, K.M. Contributions of green light to plant growth and development. **American Journal of Botany**, Saint Louis, v.100, n.1, p.70-78, 2013.
- WHITELAM, G.; HALLIDAY, K. **Light and plant development**. Blackwell: Oxford, UK, 2007.
- YANAGI, T.; OKAMOTO, K.; TAKITA, S. Effect of blue and red light intensity on photosynthetic rate of strawberry leaves. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT PRODUCTION IN CLOSED ECOSYSTEMS**, 440., Narita, 1996. p.371-376.
- YANAGI, T.; OKAMOTO, K.; TAKITA, S. Effects of blue, red, and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT PRODUCTION IN CLOSED ECOSYSTEMS**, 440., Narita, 1996. p.117-122.
- YEH, N.; CHUNG, J.P. High-brightness LEDs - energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v.13, n.8, p.2175-2180, 2009.
- ZEIGER, E. Blue light and stomatal function. In: Blue light effects in biological systems. **Springer Berlin Heidelberg**, Heidelberg, p.484-494, 1984.