












Suplementação luminosa na cultura da soja em sistema de irrigação

Cintia DANIEL ^{*1}, Reginaldo Ferreira SANTOS ¹, Luciene Kazue TOKURA ¹,
Agostinho Rodrigues ZITHA ¹, Noé Barroso dos SANTOS ¹, Mayra Beatriz Semiano CASTRO ¹,
Juliana de Souza PINTO ¹, Raynne Raphaela Rodrigues SANTOS ¹, Vitória HUBNER ¹

¹ Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, Brasil.

*E-mail: cintia.daniel1998@gmail.com

Submetido em: 01/02/2025; Aceito em: 14/06/2025; Publicado em: 24/06/2025.

RESUMO: A luz suplementar na soja pode melhorar a fotossíntese, estimular o crescimento e refletir em maior produtividade. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos dessa prática sobre parâmetros agrônômicos, fisiológicos e bioquímicos. O experimento foi realizado em Cascavel-PR, com as cultivares de soja: BMX Zeus IPRO (C1), BMX Trovão I2X (C2) e BMX Lança IPRO (C3), sob condições controladas de luz e irrigação. A luz suplementar foi aplicada do estágio V3-V4 até R5-R6, utilizando lâmpadas LED de espectro completo instaladas no pivô de irrigação. Não foram observadas diferenças significativas nos níveis de proteína e fibra bruta, contúdo, umidade, compostos voláteis, matéria seca, extrato etéreo e resíduo mineral diferiram entre as cultivares. A Zeus IPRO se destacou com maior teor de matéria seca e resíduo mineral, enquanto a Lança IPRO teve maior umidade e voláteis, e a Trovão I2X, maior extrato etéreo. A cultivar C1 apresentou melhor desempenho em germinação, desenvolvimento inicial, produtividade e peso de mil grãos, apesar de menor densidade de plantas. Já a C3 teve mais plantas por hectare, porém menor produtividade e peso de mil grãos. Ambas superaram a média estadual, indicando que a suplementação leve de light combinada com irrigação pode beneficiar a cultura.

Palavras-chave: *Glycine max* L.; oleaginosas; iluminação artificial; manejo de irrigação.

Light supplementation in soybean cultivation under irrigation systems

ABSTRACT: Supplemental lighting in soybean cultivation can enhance photosynthesis, stimulate growth, and lead to increased productivity. This study aimed to evaluate the effects of this practice on agronomic, physiological, and biochemical parameters. The experiment was conducted in Cascavel, Paraná, using the soybean cultivars BMX Zeus IPRO (C1), BMX Trovão I2X (C2), and BMX Lança IPRO (C3), under controlled light and irrigation conditions. Supplemental light was applied from the V3–V4 to R5–R6 growth stages, using full-spectrum LED lamps installed on the center-pivot irrigation system. No significant differences were observed in crude protein and fiber content; however, moisture, volatile compounds, dry matter, ether extract, and ash content differed among the cultivars. Zeus IPRO stood out for its higher levels of dry matter and ash, Lança IPRO had greater moisture and volatile content, while Trovão I2X showed the highest ether extract values. Cultivar C1 showed superior performance in germination, early development, yield, and thousand-seed weight, despite lower plant density. In contrast, C3 exhibited a higher plant population but lower yield and seed weight. Both cultivars outperformed the state average, suggesting that the use of supplemental lighting combined with irrigation can positively influence soybean productivity.

Keywords: *Glycine max* L.; oilseeds; artificial lighting; irrigation management.

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) destaca-se como uma das principais oleaginosas ricas em proteínas e óleos comestíveis para consumo humano e animal (ALEEM et al., 2021). Essa cultura pertence à família Fabaceae e é cultivada em todo o mundo, ocupando o 4º lugar entre as principais culturas agrícolas, depois do trigo, milho e arroz (ZHAO et al., 2017).

Sua produção global foi estimada em 420,87 milhões de toneladas na safra 2024/25. Nesse contexto, o Brasil mantém sua posição de liderança, respondendo por expressivos 167,87 milhões de toneladas colhidas no mesmo período. Entre os estados brasileiros, o Paraná destaca-se como o segundo maior produtor nacional, com uma produção de 21,40 milhões de toneladas na última safra (EMBRAPA, 2025).

Por trás do notável desempenho produtivo que a soja vem apresentando nos últimos anos, sobretudo em contextos de alta tecnologia no campo, há um conjunto de obstáculos agrônômicos que não pode ser ignorado. Ao longo de seu ciclo, a cultura está sujeita a inúmeros fatores ambientais adversos. Entre esses, talvez um dos mais determinantes seja a radiação solar, cuja duração diária atua como eixo regulador de fases críticas, a exemplo da floração e do enchimento de grãos (STANIAK et al., 2023). A sensibilidade da planta à fotoperiodicidade, nesse sentido, não apenas interfere diretamente em seu desenvolvimento, como também impõe limites e possibilidades quanto à sua adaptação a distintas latitudes (LIN et al., 2021). É nesse ponto que entra o manejo hídrico: quando bem conduzido, tende a suavizar os impactos desse estresse, ampliando a resiliência da lavoura e,

por consequência, sua performance geral (CHEN et al., 2023).

Nesse esforço para garantir estabilidade produtiva mesmo sob condições variáveis, a irrigação surge como ferramenta-chave em muitas regiões produtoras do país. Estados como Mato Grosso, Goiás, o Distrito Federal e, ainda, áreas no Paraná, na Bahia e no Tocantins vêm ampliando de forma expressiva a adoção de sistemas irrigados. No Paraná, por exemplo, o uso da irrigação se estende até fases decisivas como o florescimento e o enchimento de grãos, configurando uma prática consolidada e respaldada por dados técnicos (IDR, 2023). Já nas áreas do MATOPIBA, com destaque para o oeste baiano e o sul tocanense, a aplicação hídrica tem se mostrado indispensável, especialmente na produção de sementes, cuja exigência por estabilidade e uniformidade é notoriamente alta (ANA, 2023). Essa regionalização do manejo não apenas reflete as peculiaridades edafoclimáticas, mas também a crescente sofisticação das estratégias adotadas por produtores atentos às nuances da fisiologia vegetal.

Nos últimos anos, tem ganhado força o uso de luz artificial no cultivo vegetal, não apenas como complemento à radiação solar, mas também como substituto em ambientes controlados, um recurso que transcende a simples manutenção da fotossíntese. A iluminação artificial atua de forma mais abrangente, influenciando processos como alongamento de caules, diferenciação celular e até a indução floral, dependendo do espectro e da intensidade utilizados (PAUCEK et al., 2020; MARONDEDZE et al., 2018). Embora o espectro conhecido como PAR (radiation fotossinteticamente ativa, entre 400 e 700 nm) continue sendo fundamental para a captação de energia luminosa, outras faixas do espectro eletromagnético, frequentemente negligenciadas, também exercem papéis fisiológicos significativos, como: o ultravioleta (UV) e a luz vermelha distante, cujos efeitos vão muito além da fotossíntese. Fotorreceptores, entre eles os fitocromos, são particularmente sensíveis às faixas de luz vermelha e ao vermelho distante. Eles funcionam, de certa forma, como sensores internos que ajustam o crescimento das plantas conforme a qualidade da luz no ambiente, sendo cruciais para respostas típicas a sombreamento (GALVÃO; FANKHAUSER, 2015). Em outra frente, há os criptocromos e as fototropinas, que reagem preferencialmente à luz azul e ao UV-A. Esses últimos atuam sobre mecanismos como o fototropismo e a abertura estomática, além de influenciar o modo como as células se organizam, embora sutil, pode ter impacto direto na arquitetura da planta (WANG et al., 2018). Já o receptor UVR8, cuja ativação depende do UV-B, está mais associado a rotas de sinalização voltadas à defesa, como a indução de compostos antioxidantes, muitas vezes produzidos em resposta ao estresse luminoso (JENKINS, 2017). Ou seja, mesmo luzes que escapam ao espectro tradicionalmente utilizado para a fotossíntese podem alterar, de maneira profunda, o metabolismo vegetal. A partir disso, o uso controlado de LEDs vem se consolidando como um instrumento altamente versátil para manipular, com precisão surpreendente, tanto o crescimento quanto a qualidade final das culturas (BANTIS et al., 2018).

Os LEDs proporcionam maior eficiência energética, permitindo uma redução nos custos de energia elétrica, juntamente com características de desempenho como robustez, compacidade, durabilidade e longa vida útil,

representando uma opção econômica amplamente apreciada em ambientes comerciais. A baixa emissão de calor permite que a fonte de luz seja colocada próxima ao dossel da planta, proporcionando distribuição espectral igual e evitando danos aos tecidos devido ao fotoestresse (TRIVELLINI et al., 2023). Além disso, devido às vantagens da seleção de luz de alta intensidade e modulação espectral, os LEDs atendem notavelmente aos requisitos especiais das propriedades ópticas das folhas, que incluem atividade fotossintética dinâmica e processos bioquímicos para controlar o crescimento e desenvolvimento das plantas (KARABOURNIOTIS et al., 2021).

Diante do exposto, este trabalho investiga se a suplementação de luz produz efeitos em parâmetros agrônômicos, fisiológicos e bioquímicos, de diferentes cultivares de soja; além disso, destaca os potenciais benefícios que essa técnica pode proporcionar em relação ao aumento da produtividade e qualidade dos grãos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização do experimento

O experimento foi conduzido na área experimental da Cooperativa Agroindustrial Coopavel no município de Cascavel-PR, localizada a 24° 57' 20" S, 53° 27' 19" W e 782 metros acima do nível do mar. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, Cascavel está situada na região climática do Cfa, com verões quentes e temperaturas superiores a 22 °C nesta estação, com mais de 30 mm de chuva no mês mais seco (CLIMA, 2017).

2.2. Classificação dos solos

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico. Os resultados das análises físicas e químicas do solo (0-100 cm) estão descritos na Tabela 1.

2.3. Condução do experimento

O experimento foi conduzido em uma área total de 1.730 m², dividida em 3 parcelas com 576,66 m² de área útil, sendo que cada parcela recebeu um tratamento (três cultivares de soja). Cada tratamento foi constituído por sete parcelas experimentais (repetições). Os parâmetros avaliados em cada tratamento foram relacionados às características morfológicas e à produtividade de grãos.

2.4. Sistema de suplementação de luz

Um pivô de irrigação foi equipado com um sistema de suplementação de luz, composto por painéis de LED de espectro total (Figura 1). As principais proporções espectrais de RGB (cores primárias vermelho, verde e azul) foram de aproximadamente 59% vermelho, 33% verde e 8% azul. Uma faixa de luz contínua, com dimensões de cerca de 6 metros de largura por 25 metros de comprimento, foi projetada abaixo da extensão do pivô.

2.5. Características dos painéis de LED

Cada painel de LED tem uma faixa de potência entre 50 e 200 watts (W). Durante o processo de suplementação de luz, foi consumida uma média de 600 watts-hora por hectare (Wh ha⁻¹). Os painéis de LED foram posicionados aproximadamente 3 metros acima do dossel da planta e distribuídos para garantir uma distribuição uniforme da luz. O fluxo luminoso por unidade de área (lux) no nível do dossel da soja foi de cerca de 30 lux.



Figura 1. Pivô de irrigação equipado com placas de diodos emissores de luz (LED). Fonte: Grupo Fienile (2023).
Figure 1. Irrigation pivot equipped with light-emitting diode (LED) panels. Source: Grupo Fienile (2023).

2.6. Preparação da área

O preparo da área antes da semeadura da soja envolveu a aplicação de dessecantes pré-emergentes, Glifosato (N-(fosfonometil)glicina) na dosagem de 4 L ha⁻¹ e Reator (2-(2-clorobenzil)-4,4-dimetil-1,2-oxazolidin-3-ona) na dosagem de 2 L ha⁻¹. A adubação foi realizada de acordo com a análise do solo e histórico da área, aplicando-se 400 kg ha⁻¹ de NPK 04-24-16+Micro.

Foram utilizadas as seguintes cultivares de soja: BMX Zeus IPRO (C1), BMX Trovão I2X (C2) e BMX Lança IPRO (C3). A cultivar Zeus IPRO possui alto potencial produtivo, excelente adaptação a regiões de maior altitude, maturidade precoce, crescimento controlado e resistência ao acamamento. O Trovão I2X possui um grupo de maturidade de 5,2, alto potencial de rendimento, ciclo precoce, excelente adaptação a grandes altitudes, crescimento controlado com resistência ao acamamento e alto potencial de rendimento. Por fim, o Lança IPRO possui alto potencial de ramificação, resistência ao acamamento, crescimento controlado, excelente produtividade e permite a semeadura precoce e a semeadura safrinha (BRASMAX, 2024).

Tabela 1. Caracterização física e química do solo nas camadas de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm.
Table 1. Physical and chemical characterization of the soil in the layers of 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, and 80-100 cm.

Parâmetros	Camadas do solo (cm)				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
pH (cmolc dm ⁻³)	5,36	5,20	5,21	5,15	5,09
CTC (cmolc dm ⁻³)	9,13	9,81	11,14	12,72	14,00
Saturação de base (%)	51,09	51,62	53,41	55,50	63,02
Matéria Orgânica (g dm ⁻³)	43,37	35,07	28,65	23,14	20,43
Carbono (g dm ⁻³)	25,21	20,39	16,66	13,46	11,88
Fósforo (mg dm ⁻³)	25,92	8,09	3,47	1,75	1,32
Boro (mg dm ⁻³)	0,48	0,45	0,43	0,41	0,33
Enxofre (mg dm ⁻³)	9,15	13,85	14,16	12,56	11,78
Ferro (mg dm ⁻³)	31,46	36,15	36,88	38,34	48,99
Manganês (mg dm ⁻³)	17,20	14,48	14,88	14,78	17,95
Cobre (mg dm ⁻³)	4,75	5,91	6,60	6,83	6,85
Zinco (mg dm ⁻³)	5,38	3,06	4,28	2,13	1,75
Ca (cmolc dm ⁻³)	5,73	4,50	3,71	3,09	2,84
Mg (cmolc dm ⁻³)	2,46	2,08	1,82	1,60	1,50
K (cmolc dm ⁻³)	0,65	0,50	0,46	0,36	0,31
Al (cmolc dm ⁻³)	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00
H + Al (cmolc dm ⁻³)	5,16	5,60	5,15	4,76	4,47
Areia (g kg ⁻¹)	5,73	3,73	4,06	-	-
Silte (g kg ⁻¹)	35,93	39,03	28,70	-	-
Argila (g kg ⁻¹)	58,34	57,25	67,24	-	-

CTC = capacidade de permuta catiônica a pH 7; V = saturação por bases; MOS = matéria orgânica do solo.

2.7. Características do pivô

O pivô instalado no local do estudo tinha um comprimento total de 22 metros, com uma tubulação de 6 polegadas de diâmetro e um raio irrigado de 23,3 m, operando em um ângulo de trabalho de 360°. A vazão do sistema era de 14 m³/h, com motor redutor (modelo ICI – 1:50) a 43 rpm. O metro percentual foi ajustado para 30%, resultando em uma lâmina de água aplicada de 19,3 mm por evento, em intervalos que variaram entre três e quatro dias. Esse valor foi estimado a partir da evapotranspiração de referência (ET_o) multiplicada por coeficientes de cultura (K_c) ajustados de acordo com os estágios fenológicos das plantas e as condições climáticas locais, seguindo critérios propostos por Allen et al. (1998). Considerando uma ET_o média diária em torno de 4,5 mm, a necessidade hídrica total da cultura durante o ciclo foi de aproximadamente 603 mm.

A partir disto, foi possível inferir um K_c médio de 1,15, valor este apontado por Doorenbos; Kassam (1979) e em dados da Embrapa (2013).

2.8. Aplicação de luz suplementar

A aplicação de luz suplementar iniciou-se durante o estágio V3-V4 (quando a terceira a quarta folha trifoliolada estava totalmente expandida) e terminou durante o estágio fenológico R5-R6 (quando as sementes começam a encher) da cultura da soja. O sistema de iluminação era ativado todas as noites após o pôr do sol completo e em dias muito nublados. O pivô completou uma rotação completa sobre a área de cultivo a cada 2 horas e 20 minutos (em uma rotina circular), com aproximadamente 140 horas de luz suplementar aplicada em toda a área durante o ciclo da cultura da soja.

2.9. Condições climáticas durante o período experimental

Um total de 344,93 mm de chuva foi acumulado na área do experimento durante sua condução. A temperatura média

baixa foi de 18,57°C e a temperatura média alta foi de 27,97°C, conforme mostrado na Figura 2.

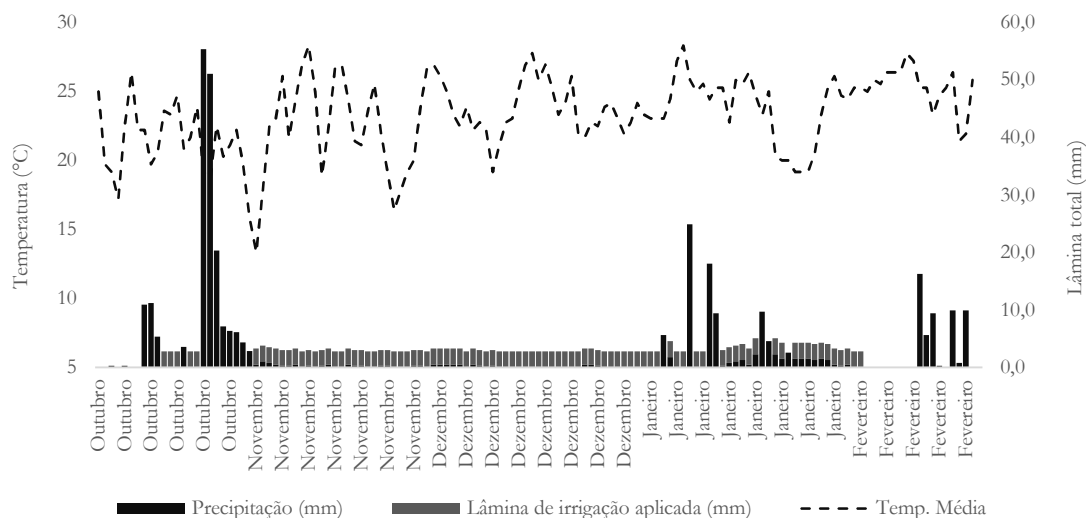


Figura 2. Precipitação (mm), Lâmina de irrigação aplicada (mm) e temperatura média (°C) na área da condução do experimento.
Figure 2. Precipitation (mm), applied irrigation depth (mm), and average temperature (°C) in the experimental area.

2.10. Avaliação de parâmetros

Após a colheita, as amostras de sementes foram enviadas para um laboratório especializado no município de Cascavel – PR, para avaliação dos seguintes parâmetros: umidade dos grãos e compostos voláteis (%); matéria seca (%); proteína bruta (%); extrato etéreo (%); fibra bruta (%); resíduo mineral (%) e teor de nutrientes (nitrogênio total, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, ferro, manganês, zinco e sódio, expressos em g kg⁻¹). Outros parâmetros avaliados incluíram:

- Tamanho dos grãos: os tamanhos dos grãos foram obtidos usando peneiras dos tamanhos 8,00, 6,30, 5,60 e <5,60mm. A mesma quantidade de grãos foi utilizada para todos os tratamentos, sendo contados os grãos retidos em cada peneira para determinar a distribuição granulométrica para cada tratamento.
- Número de plantas por hectare: foram coletadas plantas de 1 m² de cada parcela experimental dos tratamentos para obter o número de plantas por metro quadrado, utilizando-se a Equação 01.

Média de plantas/m² = [Número total de plantas em todas as áreas de amostragem / Número de áreas de amostragem] x 100 (01)

Após a obtenção do número de plantas/ha, a conversão para plantas por hectare foi realizada por meio da Equação 02.

Número de plantas ha⁻¹ = [Área total do campo (m²) / Área de amostragem (m²)] (02)

- Número de vagens por planta: ao coletar as plantas para obter o número de plantas por hectare, também foi obtido o número de vagens por planta. Isso foi feito por meio da contagem direta do número de vagens das plantas coletadas em 1 m² de cada parcela experimental dos tratamentos.

- Produtividade em sacas por hectare (sc ha⁻¹) Total: a produtividade foi obtida através do número de plantas ha⁻¹, peso de sementes e umidade (corrigida para 14%), proporcionando produtividade em kg ha⁻¹. Os valores foram então convertidos para sc ha⁻¹.
- Peso de 1000 grãos: para a determinação do peso de mil grãos (PMG), foram contadas 100 sementes por repetição com o auxílio de um contador manual. Em seguida, o valor obtido foi multiplicado por dez, permitindo a estimativa do PMG para cada tratamento. A equação correspondente está apresentada a seguir (Equação 3).

$$PMG = \left(\frac{\sum \text{Peso de 100 sementes}}{n} \right) \times 10 \quad (03)$$

em que: PMG = peso de mil grãos (g); n = número de repetições; \sum Peso de 100 sementes = soma dos pesos das 100 sementes por repetição.

- Porcentagem de germinação: a porcentagem de sementes germinadas foi obtida por meio de bandejas plásticas de 30x15cm preenchidas com areia de textura média. Cinquenta sementes foram semeadas em cada bandeja, com cada tratamento (C1, C2 e C3) com quatro repetições (bandejas). A porcentagem de germinação foi calculada usando a Equação (4).

Porcentagem de germinação = [Número de sementes germinadas / Número total de sementes testadas] x 100 (04)

- Índice de velocidade de germinação (IVG): durante o teste de germinação, o número de sementes germinadas foi contado a cada dia durante oito dias. Após a coleta de dados, o número total foi dividido pelo número de dias para obtenção do índice de germinação das sementes de soja para cada tratamento.

2.11. Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância por meio do teste F ($p < 0,05$) e, quando os tratamentos e interações foram significativos, a comparação de médias foi realizada por meio do teste de Tukey ($p < 0,05$). O programa utilizado para as análises estatísticas foi o Sisvar® (FERREIRA, 2019).

3. RESULTADOS

As variáveis proteína e fibra bruta não apresentaram diferenças significativas entre as cultivares (Tabela 2). No entanto, as variáveis umidade e voláteis, matéria seca, extrato etéreo e resíduo mineral apresentaram diferenças

significativas ($p < 0,05$) entre as cultivares analisadas. A cultivar C3 apresentou as menores médias de matéria seca, extrato etéreo e resíduo mineral. Essa mesma cultivar apresentou a maior porcentagem de umidade e voláteis em suas sementes.

A cultivar C1 apresentou maiores percentuais de matéria seca e resíduo mineral e menores percentuais de umidade e voláteis em relação aos demais tratamentos. A porcentagem de extrato etéreo foi maior na cultivar C2 e menor na cultivar C3. As quantidades de boro, cobre, ferro, manganês, zinco e sódio apresentaram tendências semelhantes em todos os tratamentos, sendo nitrogênio total, potássio, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre os nutrientes mais acumulados em todos os tratamentos em sementes de soja (Figura 3).

Tabela 2. Teores médios de umidade e voláteis (UV), matéria seca (MS), proteína bruta (PB), extrato etéreo (EE), fibra bruta (FB) e resíduo mineral (RS) das sementes de soja.

Table 2. Average contents of moisture and volatiles (UV), dry matter (MS), crude protein (PB), ether extract (EE), crude fiber (FB), and mineral residue (RS) of soybean seeds.

Tratamentos	Umidade e voláteis (%)	Matéria seca (%)	Proteína bruta (%)	Extrato Etéreo (%)	Fibra bruta (%)	Resíduo Mineral (%)
C1	11,84 a	88,15 b	32,85 a	19,73 b	5,04 a	4,98 b
C2	11,56 b	88,43 a	32,23 a	21,22 a	4,93 a	6,08 a
C3	11,84 a	88,15 b	32,85 a	19,73 b	5,04 a	4,98 b
CV (%)	0,91	0,11	1,25	0,73	5,84	0,68
P-valor	<0,05*	<0,05*	0,13ns	<0,05*	0,49ns	<0,05*

C1: Zeus IPRO; C2: Trovão I2X e C3: Lança IPRO. As médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância | *Significativo a 5% de probabilidade | ns não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

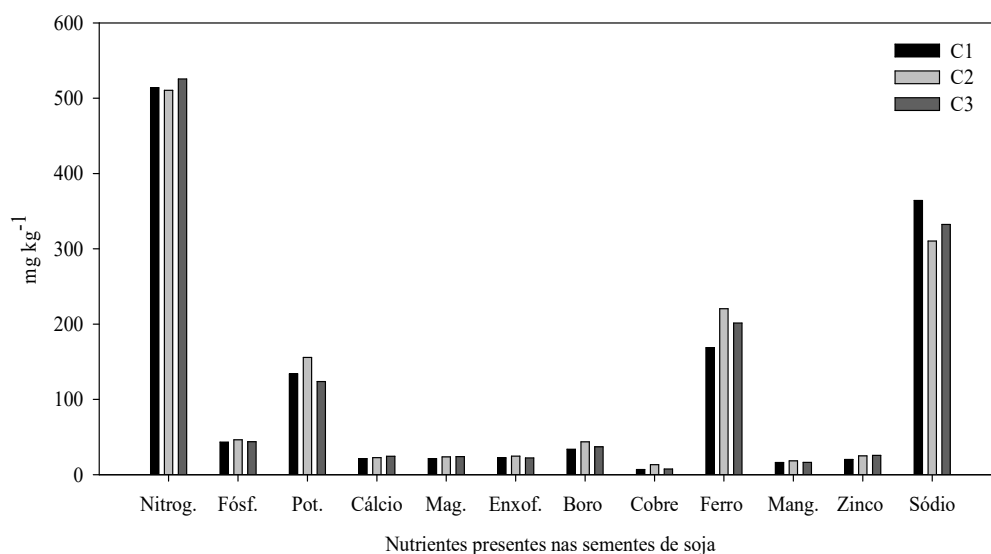


Figura 3. Teores dos nutrientes presentes nas sementes das cultivares de soja.

Figure 3. Nutrient contents present in the seeds of soybean cultivars.

A cultivar C2 apresentou as maiores porcentagens de fósforo, potássio e enxofre em relação aos demais tratamentos. Para a cultivar Zeus IPRO (C1), o nutriente mais acumulado foi o Zinco, enquanto os demais nutrientes apresentaram valores menores em relação aos demais tratamentos. A C3 apresentou aumento apenas para nitrogênio total e magnésio.

Os resultados do teste de germinação e do Índice de Velocidade de Emergência (Figura 4) indicaram que a cultivar C1 apresentou resultados mais favoráveis em relação aos demais tratamentos em termos de capacidade germinativa. No entanto, para os testes de índice de velocidade de emergência, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos. A variável granulometria apresentou

diferenças significativas entre os tratamentos. A Tabela 3 mostra que as cultivares C2 e C3 apresentaram maiores quantidades de seus grãos nos tamanhos 6,30 e 5,60 mm, enquanto a cultivar C1 apresentou maiores quantidades de grãos nos tamanhos 8,00 e 6,30 mm e menores nos tamanhos 5,60 e <5,60 mm, em comparação com os demais tratamentos.

A cultivar BMX Zeus IPRO apresentou o menor número de plantas por hectare em relação aos demais tratamentos. O mesmo tratamento apresentou os melhores resultados para peso e produtividade de 1000 grãos. Por outro lado, a cultivar BMX Lança IPRO apresentou o maior número de plantas por hectare e os menores resultados para peso de 1000 grãos e produtividade em Sc por hectare (Tabela 4).

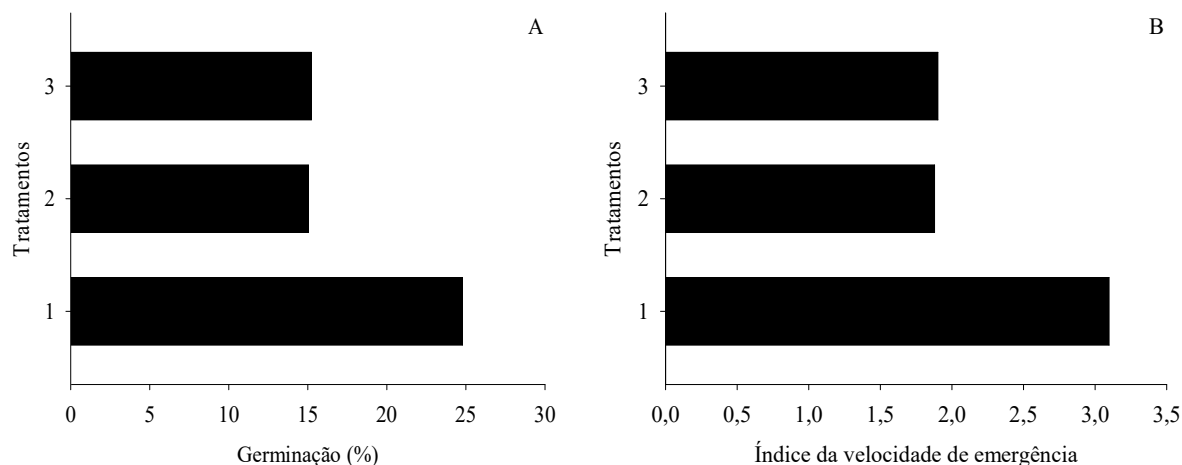


Figura 4. Germinação (A) e Índice de velocidade de germinação (B).

Figure 4. Germination (A) and Germination Speed Index (B).

Tabela 3. Quantidade de grãos de soja retidos em peneiras de 8; 6,30; 5,60 e <5,60 mm.

Table 3. Quantity of Soybeans Retained on Screens of 8; 6.30; 5.60 and <5.60 mm.

Tratamentos	Tamanho de grãos em peneiras (mm)			
	8,00	6,30	5,60	< 5,60
C1	4,75 a	74,25 a	16,62 b	4,50 b
C2	3,25 ab	47,00 b	45,00 a	4,75 b
C3	0,75 b	40,75 b	45,25 a	13,25 a
CV (%)	66,88	23,04	30,43	53,05
P-valor	<0,05*	<0,05*	<0,05*	<0,05*

C1: Zeus IPRO; C2: Trovão I2X; e C3: Lança IPRO. As médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância | *Significativo a 5% de probabilidade | ns não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 4. Número de plantas (A), número de vagens (B), peso de 1000 grãos (C) e produtividade (D) das cultivares de soja.

Table 4. Number of plants (A), number of pods (B), weight of 1000 grains (C), and productivity (D) of soybean cultivars.

Tratamentos	Número de plantas ha ⁻¹	Número de vagens planta ⁻¹	Peso de 1000 grãos	Produtividade Sc ha ⁻¹
C1	11542,2 b	363,4 b	190,52 a	170,07 a
C2	12713,6 ab	411,2 ab	178,30 b	122,90 b
C3	15770,7 a	477,4 a	158,88 c	105,39 b
CV (%)	14,18	13,93	1,86	17,84
P-valor	<0,05*	<0,05*	<0,05*	<0,05*

C1: Zeus IPRO; C2: Trovão I2X; e C3: Lança IPRO. As médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância | *Significativo a 5% de probabilidade | ns não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

4. DISCUSSÃO

A produtividade e a qualidade da soja resultam de uma interação complexa entre fatores ambientais, práticas de manejo e a constituição genética das cultivares (ASSEFA et al., 2019). Neste estudo, todos os genótipos foram cultivados sob condições uniformizadas de clima e manejo, o que permitiu isolar os efeitos da suplementação luminosa artificial com LEDs.

As variáveis proteína e fibra bruta não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre as cultivares (Tabela 2). Por outro lado, parâmetros como umidade, compostos voláteis, matéria seca, extrato etéreo e resíduo mineral evidenciaram variações expressivas ($p < 0,05$). A cultivar C1 (BMX Zeus IPRO) destacou-se com os maiores teores de matéria seca e minerais, bem como os menores índices de umidade e compostos voláteis, sugerindo uma fisiologia mais eficiente na conversão de assimilados e na maturação dos grãos. Em contraste, C3 (BMX Lança IPRO) apresentou o pior desempenho composicional, com elevada umidade e baixos níveis de matéria seca. Diversas pesquisas

têm demonstrado que a exposição à luz artificial, em especial àquela fornecida por LEDs, pode intensificar a atividade fotossintética, favorecendo o acúmulo de biomassa e o aumento da fixação de carbono nas plantas (LIU et al., 2020b). Este fenômeno parece alinhar-se aos resultados obtidos na cultivar C1, que exibiu elevada produtividade e padrões superiores de composição dos grãos (Tabela 4).

Além disso, faixas espectrais específicas, como a luz azul e a vermelha, têm sido associadas à ativação de vias metabólicas que promovem a biossíntese de proteínas e lipídios (CHEN et al., 2017). Tal efeito pode explicar o alto teor de extrato etéreo observado em C2, bem como sua destacada concentração de macronutrientes essenciais como fósforo, potássio e enxofre (Figura 3), que desempenham funções críticas nos processos bioquímicos e estruturais da semente. Outro ponto de destaque refere-se à influência da luz artificial na translocação e redistribuição de minerais dentro da planta. Conforme relatado por Liu et al. (2020a), a suplementação com LEDs pode alterar a eficiência no transporte de nutrientes para os órgãos de reserva, o que se

traduz nos maiores teores de zinco observados em C1 e nos elevados níveis de magnésio e nitrogênio total detectados em C3.

Quanto à germinação, os dados indicam que a cultivar C1 apresentou o melhor desempenho em termos de porcentagem germinativa (Figura 4A). Apesar de o Índice de Velocidade de Emergência (IVE) não ter mostrado variações estatísticas relevantes (Figura 4B), a uniformidade de emergência e o vigor inicial reforçam a superioridade adaptativa da Zeus IPRO sob as condições experimentais. Esse desempenho pode estar vinculado à maior interceptação de luz nas fases iniciais de desenvolvimento, uma vez que a luminosidade também regula mecanismos hormonais e moleculares relacionados à germinação e à morfogênese (EBONE et al., 2020; CARRERA-CASTAÑO et al., 2020).

A análise granulométrica (Tabela 3) evidencia, mais uma vez, a superioridade de C1, que apresentou maior proporção de grãos nas peneiras de 6,30 mm e 8 mm, indicando grãos mais uniformes e bem desenvolvidos. De acordo com Xu et al. (2017), cultivares de sementes grandes podem ter baixa tolerância a condições ambientais adversas, aumentando a variabilidade na produção de soja. Por ser uma dicotiledônea, durante a germinação das sementes, o gancho superior é usado para quebrar o solo, fazendo com que os cotilédones surjam. Sementes grandes enfrentam maior resistência ao emergir, potencialmente danificando cotilédones e meristemas apicais, afetando as taxas de emergência e sobrevivência da soja (Luo et al., 2023).

No que tange à produtividade, a cultivar C1, apesar de apresentar a menor densidade populacional (Tabela 4), compensou por meio da formação de grãos mais pesados e de maior rendimento por área (170,07 sc ha⁻¹). Já a cultivar C3, mesmo exibindo maior número de plantas e vagens por hectare, teve o pior desempenho produtivo, possivelmente em razão de uma fisiologia menos responsiva à iluminação artificial. Esse contraste evidencia que ambientes com alta suplementação luminosa podem favorecer genótipos mais eficientes em termos fotobiológicos, como é o caso da Zeus IPRO, enquanto cultivares como Lança IPRO parecem apresentar menor plasticidade fisiológica frente à luz artificial.

A menor umidade e a baixa concentração de compostos voláteis detectadas em C1 também sugerem um estágio mais avançado de maturação fisiológica. Essa redução pode ser interpretada como um indicativo de menor degradação e maior integridade estrutural das sementes. Dessa forma, os resultados obtidos indicam que a suplementação luminosa com LEDs não apenas impulsionou o acúmulo de biomassa e nutrientes, mas também favoreceu atributos qualitativos relevantes das sementes e aumentou o rendimento por área das cultivares avaliadas, especialmente da C1. Tais achados corroboram com um corpo crescente de evidências científicas que apontam os LEDs como uma ferramenta promissora no contexto da agricultura de precisão e no manejo fotobiológico de culturas agrícolas (CHEN et al., 2017; JEONG et al., 2020).

5. CONCLUSÕES

A suplementação de luz com LEDs na cultura da soja, apresentou efeitos positivos sobre diversas variáveis agrônomicas e qualidade dos grãos. O estudo indicou que essa técnica otimiza parâmetros como matéria seca, extrato etéreo e resíduo mineral das plantas, embora proteínas e fibras brutas não tenham apresentado variações significativas.

Cada cultivar respondeu de forma diferente à luz suplementar: C1 (BMX Zeus IPRO) destacou-se na germinação e retenção de nutrientes, C2 (BMX Trovão I2X) acumulou mais manganês, ferro e boro, e C3 (BMX Lança IPRO) teve resultados mais modestos, mas ainda promissores.

De modo geral, a suplementação de luz é uma estratégia viável para aumentar a produtividade e a qualidade da soja, especialmente em regiões com pouca luz solar direta. Ambas as cultivares apresentaram produtividade acima da média do Paraná, indicando que mais estudos são necessários para separar os efeitos das cultivares e das práticas de manejo com irrigação e suplementação de luz sobre a produtividade.

6. REFERÊNCIAS

- ANA_Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas Irrigação: Uso da água na agricultura irrigada – Edição 2023**. Brasília: ANA, 2023. 86p. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/AtlasIrigacao-UsodaAguanaAgriculturaIrigada.pdf>. Acesso em: 11 Jun. 2025.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 333p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALEEM, M.; RAZA, M. M.; HAIDER, M. S.; ATIF, R. M.; ALI, Z.; BHAT, J. A.; ZHAO, T. Comprehensive RNA-seq analysis revealed molecular pathways and genes associated with drought tolerance in wild soybean (*Glycine soja* Sieb. and Zucc.). **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 707-732, 2021. <https://doi.org/10.1111/ppl.13219>
- ASSEFA, Y.; PURCELL, L. C.; SALMERON, M.; NAEVE, S.; CASTEEL, S. N.; KOVÁCS, P.; ARCHONTOULIS, S.; LICHT, M.; BELOW, F.; KANDEL, H.; LINDSEY, L. E.; GASKA, J.; CONLEY, S.; SHAPIRO, C.; ORLOWSKI, J. M.; GOLDEN, B. R.; KAUR, G.; SINGH, M.; THELEN, K.; LAURENZ, R.; DAVIDSON, D.; CIAMPITTI, I. A. Assessing variation in US soybean seed composition (protein and oil). **Frontiers in Plant Science**, v. 10, e298, 2019. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00298>
- BANTIS, F.; SMIRNAKOU, S.; OUZOUNIS, T.; KOUKOUNARAS, A.; NTAGKAS, N.; RADOGLIOU, K. Current status and recent achievements in the field of horticulture with the use of light-emitting diodes (LEDs). **Scientia Horticulturae**, v. 235, p. 437-451, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.058>
- BRASMAX TEM RENDIMENTO: Região Sul. In: **Brasmax Genética: Região Sul**. 2024. Disponível em: <https://www.brasmaxgenetica.com.br/cultivar-regiao-sul/> (<https://www.brasmaxgenetica.com.br/cultivar-regiao-sul/>). Acesso em: 2 Mai. 2024.
- CARRERA-CASTAÑO, G.; CALLEJA-CABRERA, J.; PERNAS, M.; GÓMEZ, L.; OÑATE-SÁNCHEZ, L. An updated overview on the regulation of seed germination. **Plants**, v. 9, n. 6, e703, 2020. <https://doi.org/10.3390/plants9060703>
- CHEN, X. L.; WANG, H. Y.; LIU, H. Q.; WANG, Z. J.; ZHAO, R.; LI, M. Y.; LIU, Y. Effect of light quality on growth and quality of soybean seedlings. **Chinese Journal of Eco-Agriculture**, v. 25, n. 12, p. 1800-1807, 2017. <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170257>
- CHEN, Y.; LENG, Y. N.; ZHU, F. Y.; LI, S. E.; SONG, T.; ZHANG, J. Water-saving techniques: physiological

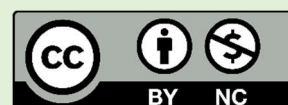
- responses and regulatory mechanisms of crops. **Advanced Biotechnology**, v. 1, n. 4, e3, 2023. <https://doi.org/10.1007/s44307-023-00003-7>
- CLIMATE-DATA.ORG. **Clima Cascavel**. Disponível em: <https://pt.climate-data.org>. Acesso em: 12 Out. 2024.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 505p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33).
- EBONE, L. A.; CAVERZAN, A.; TAGLIARI, A.; CHIOMENTO, J. L. T.; SILVEIRA, D. C.; CHAVARRIA, G. Soybean seed vigor: uniformity and growth as key factors to improve yield. **Agronomy**, v. 10, n. 4, e545, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040545>
- EMBRAPA. **Soja: dados econômicos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos> (<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>). Acesso em: 4 Jun. 2025.
- EMBRAPA. **Tecnologia de produção de soja – Região Central do Brasil 2013**. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 262p.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer statistical analysis system. **Revista Científica Symposium**, v. 6, n. 2, p. 36-41, 2011.
- GALVÃO, V. C.; FANKHAUSER, C. Sensing the light environment in plants: photoreceptors and early signaling steps. **Current Opinion in Neurobiology**, v. 34, p. 46-53, 2015.
- HELLAL, F. A.; ABDELHAMID, M. T. Nutrient management for improving land productivity and combating desertification in Egypt. **International Journal of Agronomy and Agricultural Research**, v. 3, n. 7, p. 1-11, 2013.
- HELLAL, F. A.; ABDELHAMID, M. T. Nutrient management practices for enhancing soybean (*Glycine max* L.) production. **Acta Biológica Colombiana**, v. 18, n. 2, p. 239-250, 2013.
- IDR-Paraná_Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná. **Uso da irrigação em culturas anuais no Paraná**. Curitiba: IDR-Paraná, 2023. Disponível em: <https://www.idrparana.pr.gov.br/> (<https://www.idrparana.pr.gov.br>). Acesso em: 11 Jun. 2025.
- JENKINS, G. I. Photomorphogenic responses to ultraviolet-B light. **Plant, Cell & Environment**, v. 40, n. 11, p. 2544-2557, 2017. <https://doi.org/10.1111/pce.12934>
- KARABOURNIOTIS, G.; LIAKOPOULOS, G.; BRESTA, P.; NIKOLOPOULOS, D. The optical properties of leaf structural elements and their contribution to photosynthetic performance and photoprotection. **Plants**, v. 10, e1455, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10071455>
- LIN, X.; LIU, B.; WELLER, J. L.; ABE, J.; KONG, F. Molecular mechanisms for the photoperiodic regulation of flowering in soybean. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 63, n. 6, p. 981-994, 2021. <https://doi.org/10.1111/jipb.13021>
- LIU, W.; ZHA, L.; ZHANG, Y. Growth and nutrient element content of hydroponic lettuce are modified by LED continuous lighting of different intensities and spectral qualities. **Agronomy**, v. 10, e1678, 2020(a). <https://doi.org/10.3390/agronomy10111678>
- LIU, X.; WANG, X.; WANG, X.; GAO, J.; LUO, N.; MENG, Q.; WANG, P. Dissecting the critical stage in the response of maize kernel set to individual and combined drought and heat stress around flowering. **Environmental and Experimental Botany**, v. 179, e104213, 2020(b). <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104213>
- MARONDEDZE, C.; LIU, X.; HUANG, S.; ZHAO, C.; NIEUWEHUIS, E.; AMARASINGHE, V.; RODRIGUEZ, P. L.; DEKKER, J.; KELLY, S. Towards a tailored indoor horticulture: a functional genomics guided phenotypic approach. **Horticulture Research**, v. 5, e68, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41438-018-0065-7>
- PAUCEK, I.; APPOLLONI, E.; PENNISI, G.; QUAINI, S.; GIANQUINTO, G.; ORSINI, F. LED lighting systems for horticulture: business growth and global distribution. **Sustainability**, v. 12, n. 18, e7516, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12187516>
- STANIAK, M.; SZPUNAR-KROK, E.; KOCIRA, A. Responses of soybean to selected abiotic stresses - photoperiod, temperature and water. **Agriculture**, v. 13, n. 1, e146, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010146>
- TRIVELLINI, A.; TOSCANO, S.; ROMANO, D.; FERRANTE, A. LED lighting to produce high-quality ornamental plants. **Plants**, v. 12, n. 8, e1667, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12081667>
- WANG, Y.; FOLTA, K. M.; ZHEN, S. A review of photoreceptor-mediated responses of horticultural crops to light quality and quantity. **Horticulturae**, v. 4, n. 3, e15, 2018. <https://doi.org/10.3390/horticulturae4030015>

Agradecimentos: Os autores agradecem a Universidade Estadual do Oeste do Paraná; Programa Engenharia de Energia na Agricultura; Laboratório Multiusuário de Tecnologias Sustentáveis; Fundação para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico; Grupo Fienile e a Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Contribuições dos autores: C.D. -conceitualização, metodologia, coleta de dados, análise estatística, redação (versão original), redação (revisão e edição) e administração do projeto; R.F.S., N.B.S., M.S., A.R.Z. e R.R. - conceitualização, metodologia e coleta de dados; J.S.P.: análise estatística, redação (versão original) e redação (revisão e edição); R.F.S. e N.B.S. - análise estatística e redação (versão original); M.S., A.R.Z. e R.R. - redação (revisão e edição); V.H. - contribuição pontual em atividades auxiliares relacionadas à redação ou revisão do manuscrito. Todos os autores leram o artigo na sua versão final e aprovaram a sua publicação.

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos mediante solicitação ao autor correspondente via e-mail.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflitos de interesses.



Copyright: © 2025 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons **Attribution-NonCommercial (CC BY-NC)** license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).