

TEORES DE ÓLEO, PROTEÍNA E PRODUTIVIDADE DE SOJA EM FUNÇÃO DA ESTRATÉGIA DO MANEJO DA IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR

ZANANDRA BOFF OLIVEIRA¹; ANA LUÍZA CANTO DA SILVA²; ÉRICA LUIZA GRINGS MAZUIM²; NATÁLIA FERREIRA MENDEL DA SILVA²; MARCUS VINÍCIUS TRÊS³ E GIOVANI LEONE ZABOT³

¹ Coordenadoria Acadêmica do Campus da UFSM em Cachoeira do Sul, Curso de Engenharia Agrícola e Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão - PPGAP, Rod. Taufik Germano, 3013, Passo D'Areia, 96503-205 Cachoeira do Sul/RS, e-mail: zanandra.oliveira@ufsm.br; ORCID (<https://orcid.org/0000-0003-3422-8452>).

² Curso de Engenharia Agrícola da UFSM Cachoeira do Sul, Rod. Taufik Germano, 3013, Passo D'Areia, 96503-205 Cachoeira do Sul/RS, e-mail: ana.canto@acad.ufsm.br; erica.mazuim@acad.ufsm.br; nataliamendeldasilva@gmail.com; ORCID (<https://orcid.org/0009-0006-6308-1188>, <https://orcid.org/0009-0001-1275-4016>; <https://orcid.org/0009-0005-7564-9618>)

³ Coordenadoria Acadêmica do Campus da UFSM em Cachoeira do Sul, Curso de Engenharia Agrícola e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola - PPGEA, Rod. Taufik Germano, 3013, Passo D'Areia, 96503-205 Cachoeira do Sul/RS, e-mail marcus.tres@ufsm.br; giovani.zabot@ufsm.br; ORCID (<https://orcid.org/0000-0001-5252-0735>; <https://orcid.org/0000-0001-7933-6161>)

1 RESUMO

A irrigação suplementar pode aumentar significativamente a produtividade das culturas e contribui para que os produtos agrícolas tenham melhor qualidade. Assim, o objetivo deste estudo é avaliar a produtividade, a eficiência do uso da água (EUA), o teor de óleo e de proteína da soja, em função de diferentes estratégias de manejo da irrigação suplementar: irrigação durante todo o ciclo (T1); irrigação a partir de R1 (T2); irrigação a partir de R3 (T3); sem irrigação – sequeiro (T4). A pesquisa foi realizada a campo, na área experimental da UFSM Cachoeira do Sul - RS no ano agrícola 2024-25 e a análise da qualidade de grãos realizada em laboratório (LAPE). O incremento de produtividade pela irrigação foi de 42% (T1), 31% (T2) e de 19 % (T3). A EUA foi maior para o T4 (13,05 kg mm⁻¹), seguida do T3 (11,81 kg mm⁻¹) e menor para o T1 e T2 (10,98 kg mm⁻¹). Os valores mais elevados de proteína foram obtidos no T3 (36,4%) e T2 (35,8%) e o menor valor no T4 (35,0%). O teor de óleo nos grãos (20%), não foi influenciado pelas diferentes estratégias de suprimento hídrico.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.), suprimento hídrico, sustentabilidade.

OLIVEIRA, Z. B.; SILVA, A. L. C.; MAZUIM, E. L. G.; SILVA, N. F. M.; TRÊS, M. V.; ZABOT, G. L.

SOYBEAN OIL, PROTEIN CONTENT AND YIELD AS A FUNCTION OF SUPPLEMENTAL IRRIGATION MANAGEMENT STRATEGIES

2 ABSTRACT

Supplemental irrigation can significantly increase crop productivity and improve the quality of agricultural products. In this context, the objective of this study was to evaluate soybean yield,

water use efficiency (WUE), and grain oil and protein contents under different supplemental irrigation management strategies: irrigation throughout the entire crop cycle (T1), irrigation starting at R1 (T2), irrigation starting at R3 (T3), and rainfed cultivation (T4). The experiment was conducted in the experimental area of the Federal University of Santa Maria, Cachoeira do Sul Campus, Rio Grande do Sul, Brazil, during the 2024/25 growing season. The grain quality analyses were performed at the Laboratory of Agroindustrial Process Engineering (LAPE). Compared with the rainfed treatment, the irrigation treatment increased the grain yield by 42%, 31%, and 19% for T1, T2, and T3, respectively. The highest WUE was observed in T4 (13.05 kg mm⁻¹), followed by T3 (11.81 kg mm⁻¹), while T1 and T2 presented the lowest values (10.98 kg mm⁻¹). The highest protein contents were obtained in T3 (36.4%) and T2 (35.8%), whereas the lowest value was observed in T4 (35.0%). The average grain oil content, 20%, was not affected by the different water supply strategies.

Keywords: *Glycine max* (L.), water supply, sustainability.

3 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* M.) é uma das principais culturas de verão do Brasil e desempenha um papel importante na economia. A produção concentra-se principalmente no Centro-Oeste e Sul, com Mato Grosso no topo do ranking. No estado do Rio Grande do Sul a área de cultivo de soja na safra 2024/2025 foi estimada em aproximadamente 6,8 milhões de hectares (Emater/RS-Ascar, 2025). Esse crescimento da cultura ao longo dos anos deve-se à sua elevada demanda, tanto para a alimentação humana e animal quanto para usos industriais (CONAB, 2024).

O aumento da demanda por alimentos para suprir o constante crescimento da população humana (FAO, 2009), aliado a um contexto global de mudanças climáticas representaram um grande desafio para a produção agrícola (IPCC, 2014; Tamiru; Fekadu, 2019). No mesmo tempo em que há uma necessidade real de intensificação da produção agrícola, há também a necessidade do uso de abordagens tecnológicas cada vez mais sustentáveis. Nesse contexto, a melhoria da eficiência das plantas pode ser um processo utilizado para aumentar de forma sustentável o potencial da produção agrícola (Kaiser; Galvis; Armbruster, 2019; Singer *et al.*,

2020). Isso pode ser feito usando diferentes estratégias, envolvendo o material genético e o manejo eficiente dos fatores de produção (Zanon *et al.*, 2018). Mas, também pode ser adicionado a esse conjunto, fatores de rendimento como luz e água (Gupta, 2017; Lemes *et al.*, 2021). A utilização da irrigação pode ampliar a produtividade da soja em duas ou até três vezes quando comparada ao cultivo em condições de sequeiro (Sentelhas *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2020; Oliveira; Baranzelli; Knies, 2023), já que o déficit hídrico é o principal causador de quebra de produtividade da cultura da soja no Brasil (Silva *et al.*, 2020).

Os benefícios da irrigação podem estar associados à melhorias nas condições do solo, como a aeração e a temperatura, que também influenciam a absorção de nutrientes, em especial para esse estudo, o nitrogênio (N) (Hungria; Campo; Mendes, 2007). O manejo da irrigação deve ser realizado de forma a maximizar o uso da água. Se o objetivo do agricultor irrigante for a maximização da produtividade, a gestão da irrigação implica que se efetuem irrigações necessárias para suprir totalmente as necessidades hídricas das culturas. Entretanto, se o objetivo for maximizar a eficiência do uso da água, pode-se adotar irrigação deficitária que corresponda à máxima eficiência econômica (Pereira;

Angelocci; Sentelhas, 2002). Contudo, é fundamental compreender essa relação entre o suprimento hídrico e a qualidade dos grãos produzidos já que a variação do teor de proteína e óleo é determinada principalmente por fatores genéticos, mas com forte influência ambiental, principalmente no período de enchimento de grãos (Pipolo *et al.*, 2015). O teor de proteína em grãos de soja varia de 31,7 a 57,9% e a concentração de óleo varia de 8,0 a 25,4% e determinam seu valor comercial (Pipolo *et al.*, 2015; Moraes *et al.*, 2006).

Dessa forma, o objetivo desse estudo é avaliar os componentes de rendimento, produtividade, eficiência do uso da água, teor de óleo e de proteína em grãos da soja, em função de diferentes estratégias de irrigação suplementar: irrigação durante todo o ciclo; irrigação a partir de R1; irrigação a partir de R3; e sem irrigação – sequeiro.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado no ano agrícola 2024/25 na área experimental da UFSM Cachoeira do Sul (longitude de -52,96, latitude de -30,01 e altitude de 79,2 m), cujo solo é um Argissolo Vermelho. O clima, segundo a classificação de Köppen, é subtropical (Cfa). O trabalho foi conduzido em delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro tratamentos e seis repetições, totalizando 24 parcelas experimentais. A área de cada parcela experimental foi de 6,75 m². Os tratamentos constituíram de diferentes estratégias de irrigação suplementar: irrigação durante todo o ciclo (T1); irrigação a partir de R1 (T2); irrigação a partir de R3 (T3); e sem irrigação – sequeiro (T4).

A semeadura da cultivar Brasmax Trovão I2X foi no dia 21/11/2024 com conjunto trator/semeadora utilizando-se o espaçamento entrelinhas de 0,45 m e 14 sementes por metro linear em sistema de

plantio direto, sobre resíduos vegetais de aveia branca. As sementes foram inoculadas com bactérias do gênero *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* e a adubação de base foi de 300kg ha⁻¹ da fórmula comercial 4-28-28 (N-P-K). Os demais manejos seguiram as recomendações agronômicas para a cultura.

A irrigação foi por um sistema de gotejamento superficial instalado na entrelinha de cultivo a cada 0,5 m, com espaçamento entre emissores de 0,2 m. O manejo da irrigação baseou-se no balanço hídrico do solo para manter a capacidade de água disponível (CAD) com a fração de esgotamento de 40%, variável em função da evolução do sistema radicular da cultura de 10 a 35 mm. Os dados metrológicos e a evapotranspiração de referência (ET_o), foram obtidos de uma estação automática (Metos-Brasil), instalada a cerca de 50 m do local do experimento. A evapotranspiração da cultura (ET_c), foi obtida pela multiplicação da ET_o pelo coeficiente de cultivo (K_c). O cálculo do K_c simples levou em consideração a fração de cobertura do dossel (F_c) para definir o ponto de inflexão e deflexão na curva do K_c (Allen *et al.*, 1998). Realizou-se a análise fenológica das plantas duas vezes por semana, até os estádios fenológicos de R1 e de R3, para a definição de quando iniciar as irrigações de T2 e T3.

A colheita ocorreu no dia 04/04/2025, na qual foram arrancadas e processadas as plantas da área central de cada parcela (3 m²). Após a colheita, procedeu-se a trilha, a limpeza, a determinação da umidade e a pesagem dos grãos. A massa dos grãos foi corrigida para umidade de 13% e então extrapolada para quilograma por hectare (kg ha⁻¹), destas mesmas amostras foi determinado o peso de mil grãos (PMG) (g), a partir da contagem de 1000 grãos, os quais foram pesados e corrigidos para umidade de 13%. Para análise dos componentes de rendimento, foram colhidas aleatoriamente quatro plantas de cada parcela para serem

processadas à mão, com o intuito de determinar o número de vagens por planta e o número de grãos por vagem.

A eficiência do uso da água (EUA) em kg mm^{-1} foi obtida pela razão entre a produtividade da cultura média por tratamento (kg ha^{-1}) e o total de água utilizado pela cultura (irrigada: chuva + irrigação e sequeiro: chuva).

As avaliações da qualidade dos grãos foram realizadas no Laboratório de Engenharia de Processos Agroindustriais (LAPE), da Universidade Federal de Santa Maria, Campus Cachoeira do Sul. A determinação do teor de óleo seguiu o procedimento descrito por Confortin *et al.* (2019). Para isso, amostras de 2 g de grãos de soja, em triplicata para cada tratamento, foram submetidas à extração com 200 mL de n-hexano (PA) utilizando extrator Soxhlet (Marconi®, modelo MA491/6) durante 360 minutos. As amostras foram acondicionadas em cartuchos de papel filtro e posicionadas na câmara de extração do equipamento. O solvente foi aquecido em balão de destilação por meio de manta aquecedora, promovendo sua evaporação, condensação e recirculação contínua através da amostra, possibilitando a extração do óleo. Ao término do processo, o teor de óleo foi determinado gravimetricamente.

A quantificação do nitrogênio total foi realizada conforme a metodologia proposta por Tedesco *et al.* (1995). As amostras foram submetidas à digestão ácida utilizando solução de H_2SO_4 ($0,025 \text{ mol L}^{-1}$)

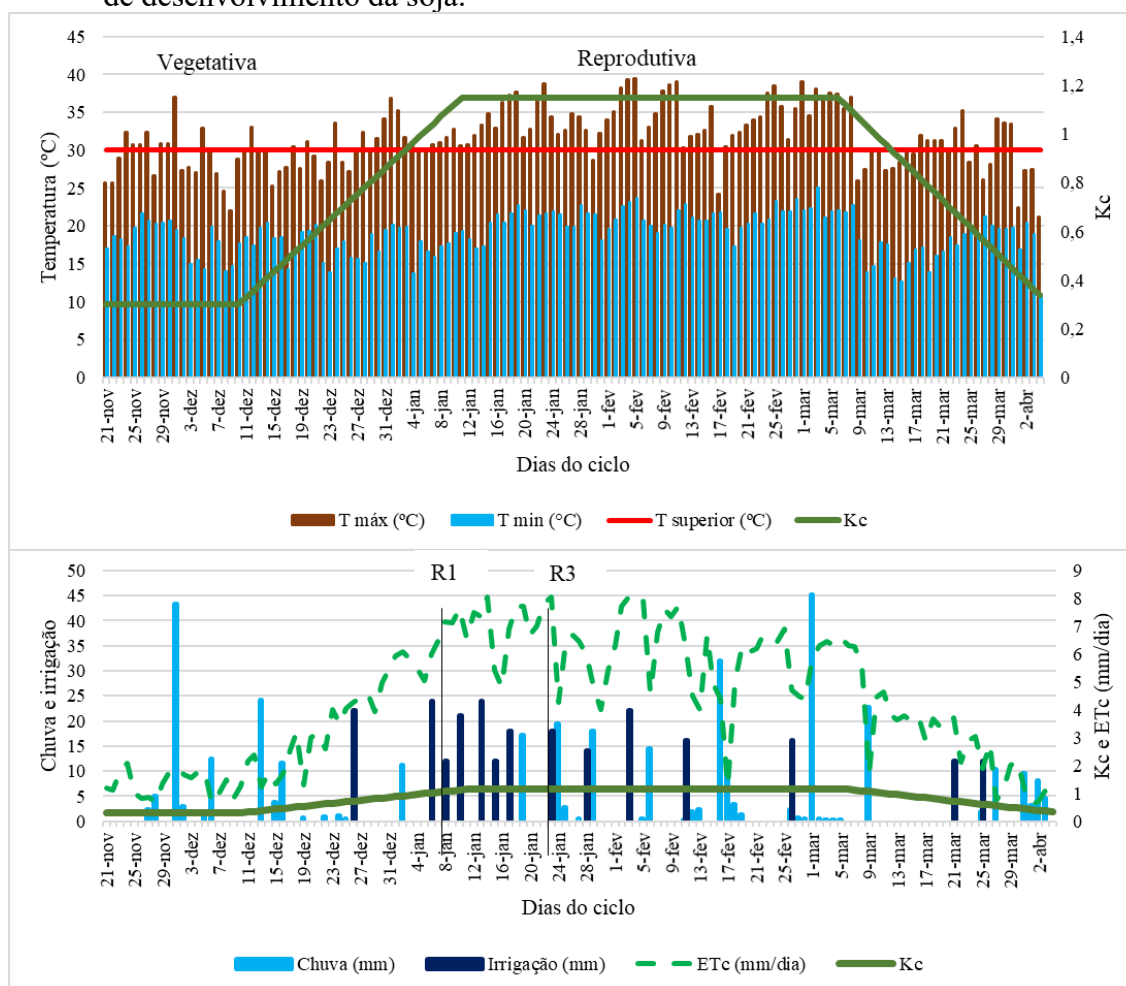
e H_2O_2 (30% v/v), seguida de destilação pelo método de Kjeldahl em destilador de arraste de vapor micro-Kjeldahl (TECNAL®, modelo TE-0363). O teor de proteína bruta foi estimado a partir do conteúdo de nitrogênio, empregando-se o fator de conversão de 6,25, recomendado para grãos de soja.

As variáveis de resposta — peso de mil grãos (PMG), número de vagens por planta, número de grãos por vagem, produtividade, eficiência do uso da água (EUA), teor de óleo e teor de proteína — foram submetidas à análise estatística. A análise de variância (teste F) foi realizada, seguida da comparação de médias pelo teste de Tukey, utilizando-se o software Sisvar, com nível de significância de 5%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o ciclo de desenvolvimento da soja, a amplitude térmica variou entre 10,7 e 39,5 °C (Figura 1). Em várias ocasiões, a temperatura máxima do ar excedeu os valores ideais para a cultura, que se situam entre 20 e 30 °C (Farias *et al.*, 2007). No período reprodutivo, por vários dias, a temperatura máxima aproximou-se de 40 °C, o que pode afetar negativamente a taxa de crescimento, prejudicar a floração e reduzir a capacidade de retenção de vagens, efeitos que se agravam em condições de déficit hídrico (Yamasaki *et al.*, 2002).

Figura 1. Variáveis meteorológicas e parâmetros do balanço hídrico observados durante o ciclo de desenvolvimento da soja.



Fonte: Autores.

As chuvas acumuladas durante o ciclo somaram apenas 356,6 mm, valor insuficiente para atender à demanda hídrica da cultura, uma vez que a evapotranspiração da cultura (ETc) acumulada foi de 577,6 mm. No início do ciclo de desenvolvimento, as precipitações foram bem distribuídas, suprimindo a necessidade hídrica da cultura até 25/12, praticamente durante toda a fase vegetativa. No entanto, em janeiro, período de elevada evapotranspiração média (6,4 mm dia⁻¹), as chuvas foram mal distribuídas e insuficientes para atender à demanda hídrica da soja, caracterizando déficit hídrico. A escassez hídrica mais expressiva foi no período de floração R1-R2, quando não houve evento de chuva entre 02/01 e 19/01 (Figura 1). Assim, a irrigação

acumulada foi de 243, 197 e 110 mm para os tratamentos T1, T2 e T3, respectivamente. O déficit hídrico é o fator principal na perda de produtividade da soja (Silva *et al.*, 2020), em função do abortamento das flores e vagens, além de diminuir o tamanho e o peso dos grãos (Kuss, 2006).

Além dos efeitos diretos do déficit hídrico sobre o crescimento e a produtividade da soja, a disponibilidade de água e as condições térmicas exercem influência significativa sobre a fixação biológica de nitrogênio. Temperaturas superiores a 30 °C podem comprometer a sobrevivência e a atividade das bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, responsáveis pela fixação simbiótica de N₂, reduzindo a disponibilidade desse nutriente para as

plantas e, conseqüentemente, a síntese de proteínas (Hungria; Vargas, 2000). Adicionalmente, a ocorrência simultânea de elevadas temperaturas e restrição hídrica pode alterar o metabolismo do carbono, promovendo modificações nas rotas bioquímicas envolvidas na formação de compostos de reserva, como proteínas e lipídios, o que afeta a composição química dos grãos (Pípolo, 2002).

A irrigação suplementar, incrementou em 50, 26 e 10% o número de vagens por planta para os tratamentos T1, T2 e T3, respectivamente (Tabela 1). Andrade Júnior *et al.* (2002), analisando níveis de irrigação para o caupi no Piauí, verificaram que o componente de produção com maior variabilidade positiva em resposta ao aumento da produtividade de grãos foi o número de vagens por planta. Oliveira,

Baranzelli e Knies (2023) obtiveram, na média de cinco anos agrícolas, um incremento do número de vagens por planta de 29,8% com a irrigação suplementar na cultura da soja em Cachoeira do Sul – RS. Já o PMG foi maior nos tratamentos T2 e T3, possivelmente pela maior quantidade de fotoassimilados alocados nos grãos em função do menor número de vagens nesses tratamentos, em comparação ao T1. Navarro Junior e Costa (2002), observaram que a redução no número de vagens por planta, sem redução da área foliar, provocou pequeno aumento no PMG. O componente grãos por vagem é ligado diretamente a genética da cultivar (Mundstock; Thomas, 2005). Assim, não foi influenciado pelos tratamentos, apresentando um valor médio nas condições de estudo de 2,33 grãos vagem⁻¹.

Tabela 1. Componentes de rendimento da soja em função das diferentes estratégias de manejo da irrigação suplementar.

Tratamento	Vagens planta ⁻¹		Grãos vagem ⁻¹		PMG (g)
T1	75,5	a	2,38	a	170,3 ab
T2	63,4	ab	2,34	a	183,7 a
T3	55,5	b	2,27	a	190,7 a
T4	50,4	b	2,35	a	165,7 b
CV	38,1		11,1		35,6
DMS	19,4		0,21		24,8

Em que: números seguidos por letras iguais nas linhas não diferem estatisticamente entre si ($p \leq 0,05$); T1: irrigação todo o ciclo; T2: irrigação a partir de R1; T3: irrigação a partir de R3; T4: Sequeiro; CV: coeficiente de variação; e DMS: diferença mínima significativa.

Fonte: Autores.

A irrigação suplementar incrementou a produtividade da soja em 42, 31 e 19%, respectivamente, no T1, T2 e T3. A produtividade máxima obtida de 6.548,3 kg ha⁻¹ demonstra que a irrigação suplementar é uma ferramenta imprescindível para a obtenção de altas produtividades de soja. Oliveira, Baranzelli e Knies (2023), em estudo nas mesmas condições edafoclimáticas, obtiveram tetos produtivos um pouco superiores, de 6.882,5 kg ha⁻¹ no ano agrícola 2020-21, quando choveu 426 mm. Pigatto, Oliveira e Knies (2023),

avaliando a produtividade de 22 cultivares de soja, também em um ano de La Niña, na mesma região de estudo, verificaram produtividades variando entre 3.507,1 e 5.043,1 kg ha⁻¹ com a utilização da irrigação suplementar, quando choveu apenas 151 mm no ano agrícola 2022-23. Assim, é notório o aumento da produtividade da soja com a maior disponibilidade hídrica. Contudo, a EUA é maior no tratamento de sequeiro (T4), seguido da estratégia de irrigação com suplementação a partir de R3 (T3).

Resultados semelhantes foram relatados por Almeida (2021), que verificou aumento da produtividade da soja com o incremento da disponibilidade hídrica, registrando rendimentos entre 2.700 e 5.400 kg ha⁻¹ para reposições de água variando de 40 a 120% da demanda da cultura. Em contrapartida, o autor observou maiores valores de EUA sob condições de menor disponibilidade hídrica. Esse comportamento está relacionado aos mecanismos fisiológicos e bioquímicos

acionados pelas plantas em resposta ao déficit hídrico (Xiong *et al.*, 2022). Entre essas adaptações destacam-se o aumento da resistência estomática (Ohsumi *et al.*, 2007), o maior desenvolvimento e aprofundamento do sistema radicular (Miyazaki; Arita, 2020) e a melhoria da eficiência no uso da água (Blum, 2009). Tais respostas também foram observadas no presente estudo, no qual os tratamentos submetidos a menor disponibilidade hídrica apresentaram maiores valores de EUA (Tabela 2).

Tabela 2. Produtividade e eficiência do uso da água pela soja em função das diferentes estratégias de manejo da irrigação suplementar.

Tratamento	Produtividade (kg ha ⁻¹)		EUA (kg mm ⁻¹)	
T1	6.548,3	a	10,98	b
T2	6.070,3	ab	10,99	b
T3	5.474,0	ab	11,81	ab
T4	4.615,2	b	13,05	a
CV	35,6		35,4	
DMS	1.701,5		1,96	

Em que: números seguidos por letras iguais nas linhas não diferem estatisticamente entre si ($p \leq 0,05$); T1: irrigação todo o ciclo; T2: irrigação a partir de R1; T3: irrigação a partir de R3; T4: Sequeiro; CV: coeficiente de variação; e DMS: diferença mínima significativa.

Fonte: Autores.

O teor de proteína nos grãos da soja teve uma pequena variação entre os tratamentos de 35,0 a 36,4%. Contudo, são diferenças significativas estatisticamente

(Tabela 3), sendo a maior concentração de proteína obtida no T3 e no T2 e a menor no T4.

Tabela 3. Teor de proteína e de óleo dos grãos de soja em função das diferentes estratégias de manejo da irrigação suplementar.

Tratamento	Proteína (%)		Óleo (%)	
T1	35,4	bc	20,0	a
T2	35,8	ab	20,3	a
T3	36,4	a	20,2	a
T4	35,0	c	19,5	a
CV	0,9		3,1	
DMS	0,8		1,6	

Em que: números seguidos por letras iguais nas linhas não diferem estatisticamente entre si ($p \leq 0,05$); T1: irrigação todo o ciclo; T2: irrigação a partir de R1; T3: irrigação a partir de R3; T4: Sequeiro; CV: coeficiente de variação; e DMS: diferença mínima significativa.

Fonte: Autores.

O estresse hídrico, somado ao efeito das altas temperaturas no período reprodutivo (Figura 1), podem explicar a menor concentração de proteína dos grãos no T4 (Pípolo, 2002; Rangel *et al.*, 2004). Pípolo (2002) observou a alteração no teor de proteínas em temperaturas elevadas, em função da menor disponibilidade de N para os grãos. Uma hipótese para a menor concentração de proteína no T1, foi a maior pressão por doenças fúngicas nas plantas desse tratamento. Doenças fúngicas causam desfolha prematura, reduzindo a área foliar disponível para a fotossíntese, processo essencial para a produção de carboidratos e, consequentemente, proteínas. Já a média do teor de óleo de 20% e não diferiu estatisticamente entre os tratamentos, embora tenha sido um pouco menor no T4 (Tabela 3), corroborando com Pipolo *et al.* (2015) quando afirma que, a variação dos teores de proteína total e óleo em grãos de soja é determinada primordialmente por fatores genéticos, ou seja, em função da cultivar escolhida.

6 CONCLUSÕES

A produtividade máxima da soja (6.548,3 kg ha⁻¹) foi obtida com a irrigação plena ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento, sempre que necessária. As estratégias de irrigação deficitária resultaram em reduções de produtividade para 6.070,3 kg ha⁻¹, quando iniciadas a partir de R1, e para 5.474,0 kg ha⁻¹, quando iniciadas a partir de R3.

Em comparação à soja de sequeiro, os incrementos de produtividade proporcionados pela irrigação foram de 42% para a irrigação durante todo o ciclo, 31% quando iniciada em R1 e 19% quando iniciada em R3.

A eficiência do uso da água foi maior nas condições de sequeiro (13,05 kg mm⁻¹), embora associada a menor produtividade, seguida pela estratégia de irrigação a partir

de R3 (11,81 kg mm⁻¹). Valores muito semelhantes foram observados para a irrigação iniciada em R1 e para a irrigação ao longo de todo o ciclo, com 10,98 kg mm⁻¹.

Os maiores teores de proteína nos grãos de soja foram observados com a irrigação iniciada em R3 (36,4%) e em R1 (35,8%), enquanto o menor valor foi registrado na soja de sequeiro (35,0%). O teor de óleo nos grãos (20%) não foi influenciado pelas diferentes estratégias de suprimento hídrico.

Quando a disponibilidade hídrica para irrigação é insuficiente para suprir todo o ciclo da cultura, recomenda-se a concentração da irrigação na fase reprodutiva, visto que essa estratégia eleva a eficiência do uso da água, aumenta a produtividade e melhora a qualidade do produto final.

7 REFÊRENCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration** - Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO, 1998. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALMEIDA, A. M. **Eficiência do uso da água e resposta termal da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021.
- BLUM, A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 112, n. 2/3, p. 119-123, 2009.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Safra 2024/25. 5º Levantamento. Brasília, DF: Conab, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/5o-levantamento-safra-2024-25/apresentacaoz5zlevzsafrasgraoz-zfev-24.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2025.

CONFORTIN, T. C.; TODERO, I.; LUFT, L.; UGALDE, G. A.; MAZUTTI, M. A.; OLIVEIRA, Z. B.; BOTTEGA, E. L.; KNIES, A. E.; ZABOT, G. L.; TRÊS, M. V. Oil yields, protein contents, and cost of manufacturing oil obtained from different hybrids and sowing dates of canola. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 7, n. 2, article 102972, 2019.

EMATER/RS-ASCAR. **Informativo Conjuntural**: estimativa da área de cultivo de soja no Rio Grande do Sul na safra 2024/2025. Rio Grande do Sul: Emater/RS-Ascar, 2025.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. (Circular técnica, 48). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/470308>. Acesso em: 03 maio 2025.

FAO. **How to Feed the World in 2050**. Roma: FAO, 2009. Disponível em: http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf. Acesso em: 23 fev. 2026.

GUPTA, S. D. **Light emitting diodes for agriculture**: smart lighting. Singapore: Springer Nature Singapore, 2017.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R.J.; MENDES, I.C. **A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja**: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro. Londrina: Embrapa Soja, 2007. (Documentos, n. 283). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/468512/1/Documentos283.pdf>. Acesso em: 03 maio. 2025.

HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. Environmental Factors Affecting N₂ Fixation in Grain Legumes in the Tropics, with an Emphasis on Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 65, n. 2/3, p. 151-164, 2000.

IPCC. **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Geneva: IPCC, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. Acesso em: 3 maio 2025.

KAISER, E.; GALVIS, V. C.; ARMBRUSTER, U. Efficient photosynthesis in dynamic light environments: a chloroplast's perspective. **Biochemical Journal**, Londres, v. 476, n. 19, p. 2725-2741, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1042/BCJ20190134>. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6792033/>. Acesso em: 03 maio 2025.

KUSS, R. C. R. **Populações de plantas e estratégias de irrigação na cultura da soja**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

LEMES, E. A.; BRENO, D. M.; ANDRADE, S. Improving Soybean Production Using Light Supplementation at Field-Scale: A Case Study. **Journal of Agricultural Studies**, Ponta Grossa, v. 9, p. 259-273, 2021.

- MIYAZAKI, A.; ARITA, N. Deep rooting development and growth in upland rice NERICA induced by subsurface irrigation. **Plant Production Science**, Tokyo, v. 23, n. 3, p. 240-252, 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1343943X.2020.1732829#abstract>. Acesso em: 6 ago. 2025.
- MORAES, R. M. A.; JOSÉ, I. C.; RAMOS, F. G.; BARROS, E. G.; MOREIRA, M. A. Caracterização bioquímica de linhagens de soja com alto teor de proteína. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 5, p. 715-729, 2006.
- MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. **Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. Disponível em: https://www.ufrgs.br/fagro/plantas/destaque/s/livro_soja.php. Acesso em: 6 ago. 2025.
- NAVARRO JÚNIOR, H. M.; COSTA, J. A. Contribuição relativa dos componentes do rendimento para produção de grãos em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 3, p. 269-274, 2002.
- OLIVEIRA, Z. B.; BARANZELLI, L. F.; KNIES, A. E. Análise da produtividade da soja em cinco anos agrícolas com a utilização da irrigação suplementar na região central do RS. **Irriga**, Botucatu, v. 28, n. 4, p. 745-755, 2023.
- OHSUMI, A.; KANEMURA, T.; HOMMA, K.; HORIE, T.; SHIRAIWA, T. Genotypic variation of stomatal conductance in relation to stomatal density and length in rice (*Oryza sativa*. L). **Plant Production Science**, Amsterdam, v. 10, n. 3, p. 322-328, 2007.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002.
- PIGATTO, G.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E. K. Desempenho agrônomo de cultivares de soja com a utilização da irrigação suplementar na safra 2022-2023. **Plantio Direto & Tecnologia Agrícola**, Passo Fundo, 2023. Disponível em: <https://plantiodireto.com.br/artigos/1552>. Acesso em: 08 set. 2024.
- PIPOLO, A. E.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; MANDARINO, J. M. G. **Teores de óleo e proteína em soja: fatores envolvidos e qualidade para a indústria**. Londrina: Embrapa soja, 2015. (Comunicado Técnico, n. 86). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/130450/1/comunicado-tecnico-86OL.pdf>. Acesso em: 08 set. 2024.
- PÍPOLO, A. E. **Influência da temperatura sobre as concentrações de proteína e óleo em sementes de soja (*Glycine max* (L.) Merrill)**. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- RANGEL, M. A. S.; CAVALHEIRO, L. R.; CAVICHIOLO, D.; CARDOSO, P. C. **Efeito do genótipo e do ambiente sobre os teores de óleo e proteína nos grãos de soja, em quatro ambientes da Região Sul de Mato Grosso do Sul, safra 2002/2003**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2004. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, n. 17). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/249210/efeito-do-genotipo-e-do-ambiente-sobre-os-teores-de-oleo-e-proteina-nos-graos-de-soja-em-quatro-ambientes-da-regiao-sul-de-mato-grosso-do-sul-safra-20022003>. Acesso em: 08 set. 2024.

- SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, A. C.; NENDEL, C. The Soybean Yield Gap in Brazil - Magnitude, Causes and Possible Solutions for a Sustainable Production. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 153, p. 1394-1411, 2015.
- SILVA, L. P.; BATTISTI, R.; KNAPP, F. M.; SANTOS, T. G.; ALVES JUNIOR, J. Estimativa da produtividade de soja usando irrigação na época das chuvas no bioma Cerrado. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 28, p. e026702, 2020.
- SINGER, S. D.; SOOLANAYAKANAHALLY, R. Y.; FOROUD, N. A.; KROEBEL, R. Biotechnological strategies for improved photosynthesis in a future of elevated atmospheric, **Planta**, Berlin, v. 251, n. 1, article 24, 2020.
- TAMIRU, L.; FEKADU, H. Effects of climate change variability on agricultural productivity. **International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources**, Florida, v. 17, n. 1, p. 14-20, 2019.
- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. (Boletim Técnico, 5).
- XIONG, Y.; CHEN, X.; TANG, L.; WANG, H. Comparison of surface renewal and Bowen ratio derived evapotranspiration measurements in an arid Vineyard. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 613, article 128474, 2022.
- YAMASAKI, T.; YAMAKAWA, T.; KOIKE, Y.; KATOH, K. Temperature Acclimation of Photosynthesis and Related Changes in Photosystem II Electron Transport in Winter Wheat. **Plant Physiology**, Miyama, v. 128, n. 3, p. 1087-1097, 2002.
- ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; RICHTER, G. L.; BECKER, C. C.; ROCHA, T. S. M.; CERA, J. C.; WINCK, J. E. M.; CARDOSO, A. P.; TAGLIAPIETRA, E. L.; WEBER, P. S.; MARTINS, J. D. **Ecofisiologia da soja: visando altas produtividades**. Santa Maria: Pallotti, 2018.