v7.n8.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

TRIAZÓIS ALTERAM A EFICIÊNCIA FOTOQUÍMICA E A INTEGRIDADE CELULAR DA SOJA COM IMPACTOS NA PRODUTIVIDADE E NO RETORNO ECONÔMICO

TRIAZOLES ALTER THE PHOTOCHEMICAL EFFICIENCY AND CELLULAR INTEGRITY OF SOYBEANS, IMPACTING PRODUCTIVITY AND ECONOMIC RETURN

LOS TRIAZOLES ALTERAN LA EFICIENCIA FOTOQUÍMICA Y LA INTEGRIDAD CELULAR DE LA SOJA, LO QUE REPERCUTE EN LA PRODUCTIVIDAD Y LA RENTABILIDAD ECONÓMICA

Ricardo de Andrade Silva[1], Gustavo Adolfo Pazzetti[2], Lucas Carvalho Paiva[3], Luiz Leonardo Ferreira[4]

e788568
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i8.8568

PUBLICADO: 08/2026

RESUMO

O uso de fungicidas triazóis na cultura da soja pode gerar efeitos fisiológicos além do controle de doenças, influenciando a fotossíntese, a integridade celular e o desempenho produtivo das plantas. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de mefentrifluconazol, difenoconazol, protioconazol e tebuconazol sobre a fase fotoquímica da fotossíntese, a estabilidade celular, a produtividade, a composição dos grãos e o retorno econômico da cultura. O experimento foi conduzido no Oeste da Bahia, durante a safra 2025/2026, utilizando a cultivar CZ 58B44 I2X, em delineamento de blocos ao acaso. Foram avaliados seis tratamentos, diferenciados na quarta aplicação do programa fungicida, incluindo aplicações isoladas e misturas de ingredientes ativos. As avaliações fisiológicas foram realizadas aos 0, 3, 7 e 14 dias após a aplicação, por meio de fluorometria da clorofila com equipamento MultispeQ®, além da análise do extravasamento de eletrólitos e da temperatura foliar. Também foram avaliados a produtividade, a massa de mil grãos e os teores de óleo e proteína. Os dados foram submetidos à análise de variância e ao teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Os resultados demonstraram respostas fisiológicas distintas entre os fungicidas. O mefentrifluconazol proporcionou maior estabilidade fisiológica e celular, com menor dissipação de energia e menor dano de membranas, além de maior teor de proteína nos grãos. Já o tebuconazol promoveu maior estresse fisiológico. A maior produtividade e o melhor retorno econômico foram obtidos com a mistura mefentrifluconazol + piraclostrobina + fluxapiroxade, evidenciando a relação entre eficiência fisiológica, desempenho agronômico e rentabilidade da cultura.

PALAVRAS-CHAVE: Fotossistema II. Fluorescência da clorofila. Fungicidas triazóis. Extravasamento de eletrólitos. Produtividade da soja. Composição de grãos.

ABSTRACT

The use of triazole fungicides in soybean crops may induce physiological effects beyond disease control, influencing photosynthesis, cellular integrity, and plant productivity. This study aimed to evaluate the effects of mefentrifluconazole, difenoconazole, prothioconazole, and tebuconazole on the photochemical phase of photosynthesis, cellular stability, grain yield, grain composition,

[1] Front Agrociência, Luís Eduardo Magalhães, Doutor em Agronomia (Fitotecnia) pela Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB).
[2] Faculdade Agronomia, Universidade de Rio Verde, Doutor em Fitotecnia - Produção Vegetal pela Universidade Federal de Goiás (FESURV/UniRV).
[3] Front Agrociência, Luís Eduardo Magalhães, Mestre em Agronomia (Fitotecnia) pela Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB).
[4] Centro Universitário de Mineiros, Doutor em Agronomia (Fitotecnia) pela Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

and the economic return of soybean production. The experiment was conducted in Western Bahia, Brazil, during the 2025/2026 growing season, using the cultivar CZ 58B44 I2X in a randomized complete block design. Six treatments were evaluated, differing in the fourth application of the fungicide program, including isolated applications and mixtures of active ingredients. Physiological assessments were performed at 0, 3, 7, and 14 days after application using chlorophyll fluorescence measurements obtained with a MultispeQ® device, as well as electrolyte leakage and leaf temperature analyses. Grain yield, thousand-grain weight, and oil and protein contents were also evaluated. Data were subjected to analysis of variance and means were compared using Tukey's test ($p \leq 0.05$). The results demonstrated distinct physiological responses among the fungicides. Mefentrifluconazole provided greater physiological and cellular stability, characterized by lower energy dissipation, reduced membrane damage, and higher grain protein content. In contrast, tebuconazole induced greater physiological stress. The highest grain yield and economic return were obtained with the mixture of mefentrifluconazole + pyraclostrobin + fluxapyroxad, highlighting the relationship between physiological efficiency, agronomic performance, and crop profitability.

***KEYWORDS**: Photosystem II. Chlorophyll fluorescence. Triazole fungicides. Electrolyte leakage. Soybean productivity. Grain composition.*

RESUMEN
El uso de fungicidas triazoles en el cultivo de soja puede generar efectos fisiológicos más allá del control de enfermedades, influyendo en la fotosíntesis, la integridad celular y la productividad. Este estudio tuvo como objetivo evaluar los efectos de mefentrifluconazol, difenoconazol, protioconazol y tebuconazol sobre la fase fotoquímica de la fotosíntesis, la estabilidad celular, la productividad, la composición de los granos y el retorno económico del cultivo. El experimento se realizó en el Oeste de Bahía, Brasil, durante la campaña agrícola 2025/2026, utilizando el cultivar CZ 58B44 I2X en un diseño de bloques al azar. Se evaluaron seis tratamientos, diferenciados en la cuarta aplicación del programa fungicida, incluyendo aplicaciones aisladas y mezclas de ingredientes activos. Las evaluaciones fisiológicas se realizaron a los 0, 3, 7 y 14 días después de la aplicación mediante fluorometría de clorofila con un equipo MultispeQ®, además del análisis de la fuga de electrolitos y de la temperatura foliar. También se evaluaron la productividad, el peso de mil granos y los contenidos de aceite y proteína. Los datos fueron sometidos a análisis de varianza y comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). Los resultados mostraron respuestas fisiológicas distintas entre los fungicidas. El mefentrifluconazol proporcionó mayor estabilidad fisiológica y celular, con menor disipación de energía, menor daño de membranas y mayor contenido de proteína. La mayor productividad y el mejor retorno económico se obtuvieron con la mezcla de mefentrifluconazol + piraclostrobina + fluxapiroxad, evidenciando la relación entre eficiencia fisiológica, desempeño agronómico y rentabilidad.

***PALABRAS CLAVE**: Fotosistema II. Fluorescencia de la clorofila. Fungicidas triazólicos. Fuga de electrolitos. Productividad de la soja. Composición del grano.*

1. INTRODUÇÃO

A soja está entre as culturas de maior relevância para os sistemas agrícolas, devido à elevada capacidade produtiva e à ampla utilização dos grãos. A expressão desse potencial depende da manutenção de um dossel foliar funcional durante os estádios reprodutivos, quando

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

aumenta a demanda por fotoassimilados para a formação e o enchimento dos grãos. As doenças foliares podem acelerar a perda de área fotossinteticamente ativa, alterar a relação entre fonte e dreno e reduzir a produtividade e a qualidade dos grãos. Por isso, o manejo fungicida constitui um componente essencial dos sistemas de produção.

Entre os grupos químicos empregados na proteção da cultura, os triazóis destacam-se pela eficácia, ação sistêmica e utilização isolada ou associada a fungicidas de outros mecanismos de ação. Sua aplicação busca reduzir o desenvolvimento de patógenos e prolongar a atividade foliar. Contudo, a resposta da cultura não se limita ao controle da doença. Fungicidas também podem modificar processos fisiológicos da planta hospedeira, com efeitos dependentes do ingrediente ativo, da dose, do ambiente e do estado fisiológico vegetal. Portanto, moléculas do mesmo grupo químico não devem ser consideradas fisiologicamente equivalentes (Thind, 2022; Elkholy *et al*., 2025).

Os triazóis atuam principalmente pela inibição da desmetilação na biossíntese de ergosterol, indispensável à funcionalidade das membranas dos fungos (Purohit *et al*., 2025; Song *et al*., 2025). Embora direcionados ao patógeno, os ingredientes ativos entram em contato com os tecidos vegetais e podem ser absorvidos, translocados e metabolizados. Diferenças na conformação molecular, lipofilicidade, persistência e seletividade ajudam a explicar a diversidade de respostas entre os compostos. Conforme a interação estabelecida, os efeitos podem variar de alterações transitórias até restrições capazes de comprometer o funcionamento celular (Jakl *et al*., 2021; Carvalho *et al*., 2025).

A exposição a xenobióticos pode alterar o equilíbrio entre produção e neutralização de espécies reativas de oxigênio. Em níveis controlados, essas espécies participam da sinalização celular; acima da capacidade antioxidante, podem intensificar a oxidação de proteínas, pigmentos e lipídios. A peroxidação lipídica modifica a permeabilidade da membrana plasmática e favorece a perda de solutos. Nesse contexto, o extravasamento de eletrólitos constitui um indicador sensível da estabilidade das membranas e do custo celular associado aos tratamentos. Combinado a outros parâmetros fisiológicos, permite diferenciar respostas de aclimatação de danos mais persistentes (Liu *et al*., 2021; Zayed *et al*., 2023).

A estabilidade das membranas relaciona-se ao desempenho fotossintético, pois as reações fotoquímicas ocorrem em complexos proteicos organizados nos tilacoides. No fotossistema II, a energia absorvida pode ser direcionada ao transporte de elétrons, dissipada de modo regulado como calor ou perdida por vias não reguladas. O equilíbrio entre esses destinos determina a capacidade foliar de utilizar a radiação sem acumular energia em excesso. Alterações na abertura dos centros de reação, na condutância de prótons e no gradiente

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

eletroquímico podem modificar a síntese de ATP e NADPH, a fotoproteção e o suprimento energético à assimilação de carbono (Kanazawa *et al*., 2017; Johnson; Berry, 2021).

A fluorescência da clorofila oferece uma abordagem rápida e não destrutiva para acompanhar essas respostas. O rendimento quântico do fotossistema II, a proporção de centros de reação abertos, o fluxo linear de elétrons e as dissipações regulada e não regulada caracterizam a utilização da energia absorvida. Entretanto, valores isolados não representam diretamente maior assimilação de carbono ou produtividade. A interpretação deve considerar a dinâmica temporal, a temperatura foliar e a integridade celular, pois o aumento da dissipação pode constituir um mecanismo de proteção, sem representar necessariamente dano irreversível ao aparato fotossintético (Baker, 2008; Saneeva *et al*., 2022).

Alterações fisiológicas provocadas pelos fungicidas adquirem importância agronômica quando persistem durante a formação e o enchimento dos grãos. A eficiência fotoquímica, a estabilidade das membranas e o equilíbrio entre os metabolismos de carbono e nitrogênio influenciam a disponibilidade de fotoassimilados e a remobilização de nutrientes. Assim, respostas detectadas nas folhas podem refletir-se na massa dos grãos, na produtividade e nos teores de óleo e proteína. Contudo, melhor desempenho fisiológico não implica necessariamente maior retorno financeiro, pois a rentabilidade também depende do custo do tratamento, do incremento produtivo e do valor da soja. A avaliação econômica, portanto, complementa os indicadores fisiológicos e agronômicos.

Apesar do amplo emprego dos triazóis, ainda é necessário esclarecer se moléculas distintas produzem respostas ecofisiológicas específicas na soja e se essas diferenças se refletem na produção, na composição dos grãos e na eficiência econômica. Parte-se da hipótese de que mefentrifluconazol, difenoconazol, protioconazol e tebuconazol diferem na modulação do fotossistema II e na preservação da integridade celular, resultando em desempenhos agronômicos e econômicos distintos. Assim, objetivou-se avaliar os efeitos desses triazóis, aplicados isoladamente ou em associação com outros ingredientes ativos na quarta aplicação do programa fungicida, sobre a eficiência fotoquímica, o balanço energético, a temperatura foliar, o extravasamento de eletrólitos, a produtividade, a massa de mil grãos, os teores de óleo e proteína e o retorno sobre o investimento na cultura da soja.

2. METODOLOGIA

O experimento foi conduzido em condições de campo na região Oeste da Bahia, na estação de pesquisa da Front Agrociência, durante a safra 2025/2026, sob sistema de sequeiro.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A área experimental apresenta clima tropical do tipo Aw, com distribuição irregular de precipitação ao longo do ciclo da cultura. Utilizou-se o cultivar de soja CZ 58B44 I2X em população de 220.000 plantas por hectare, conduzido sob manejo agronômico convencional, incluindo adubação, controle de plantas daninhas e pragas, conforme recomendações técnicas para a região. O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, composto por seis tratamentos e quatro repetições. As parcelas foram compostas por oito linhas de 8 m de comprimento, espaçadas a 0,45 m.

Os tratamentos consistiram em: T1, controle sem aplicação de triazol na quarta aplicação; T2, mefentrifluconazol, piraclostrobina e fluxapiroxade; T3, mefentrifluconazol; T4, difenoconazol; T5, protioconazol; e T6, tebuconazol. Todos os produtos utilizados apresentavam formulação do tipo suspensão concentrada (SC). A diferenciação entre os tratamentos foi estabelecida exclusivamente na quarta aplicação do programa fungicida coincidindo com a fase fenológica R6, permitindo a comparação entre formulações em mistura e triazóis isolados. Padronizou-se a dose em 80 g ha^{-1} de ingrediente ativo, possibilitando a comparação direta entre moléculas e minimizando o efeito da dose.

O manejo fitossanitário foi conduzido por meio de um programa sequencial de cinco aplicações de fungicidas, com início aos 20 dias após a emergência da cultura, com intervalos de 15 dias entre aplicações, sendo a primeira com difenoconazol (200 g L^{-1}) na dose de 300 mL ha^{-1}; a segunda aplicação foi com Blavity®, na dose de 250 mL ha^{-1}; a terceira aplicação com Belyan®, na dose de 600 mL ha^{-1}; a quarta aplicação correspondeu aos tratamentos experimentais; e a quinta aplicação foi com Keyra®, na dose de 500 mL ha^{-1}. Todas as aplicações foram realizadas via pulverização foliar, com pulverizador costal, pressurizado a CO_2, na pressão de trabalho de 2,5 kgf cm^{-2} e volume de calda de 150 L ha^{-1}. A barra de pulverização continha seis pontas do tipo leque XR 110.15 e espaçadas 0,5 m entre si.

As avaliações fisiológicas foram realizadas aos 0, 3, 7 e 14 dias após a quarta aplicação (DAA), permitindo acompanhar a dinâmica temporal das respostas das plantas aos tratamentos. As medições foram realizadas utilizando um fluorômetro portátil MultispeQ® na terceira folha completamente expandida do ápice para a base do dossel. Foram obtidos parâmetros associados à fase fotoquímica da fotossíntese e ao balanço energético foliar.

A integridade celular foi determinada por meio da análise de extravasamento de eletrólitos. Amostras foliares (1 g) foram coletadas da mesma posição das leituras fisiológicas, seccionadas e lavadas com água deionizada, sendo posteriormente incubadas em 15 mL de água bidestilada por 24 h a 24 °C. A condutividade elétrica inicial foi determinada, seguida de incubação em banho-maria por 20 min para lise total dos tecidos. Após resfriamento, foi

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

determinada a condutividade final, sendo o extravasamento expresso em porcentagem da condutividade total, conforme metodologia adaptada de Agarie *et al*. (1995).

Ao final do ciclo da cultura, foram avaliados os componentes de produção, incluindo produtividade (kg ha^{-1}) e massa de mil grãos (g). A produtividade foi determinada por meio da colheita da área útil das parcelas, com correção da umidade para 13%. A massa de mil grãos foi obtida a partir de subamostras padronizadas. Amostras de grãos foram coletadas para determinação dos teores de óleo e proteína utilizando espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), por meio do analisador portátil SCiO Cup.

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando-se os efeitos de tratamentos, tempos de avaliação e interação tratamento × tempo para as variáveis mensuradas ao longo do período experimental. Para as variáveis determinadas ao final do ciclo, considerou-se o efeito dos tratamentos no delineamento em blocos ao acaso. A adequação dos modelos foi verificada por meio dos testes de Shapiro–Wilk, para a normalidade dos resíduos, e de Bartlett, para a homogeneidade das variâncias, ambos a 5% de probabilidade. Quando constatado efeito significativo pelo teste F, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Os resultados inferenciais foram apresentados diretamente nas figuras por meio de letras e níveis de significância, dispensando-se a apresentação de uma tabela específica da análise de variância.

Adicionalmente, foram calculados os coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre as variáveis fisiológicas, bioenergéticas e produtivas. A significância das correlações foi avaliada a 5% e 1% de probabilidade, e os resultados foram apresentados em mapa de calor (heatmap). Para facilitar a visualização conjunta de variáveis expressas em diferentes unidades e escalas, os dados foram previamente padronizados por meio do escore Z (Z-score). A eficiência econômica dos tratamentos foi avaliada por meio do retorno sobre o investimento (ROI), considerando-se o incremento de produtividade em relação à testemunha, o preço de comercialização da soja e o custo de aplicação dos fungicidas, conforme a abordagem empregada em análises econômicas de programas de proteção de plantas (CPN, 2026).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros fotoquímicos do fotossistema II demonstraram respostas distintas entre os triazóis ao longo do período de avaliação. A energia absorvida pelo PSII pode ser destinada ao transporte fotoquímico de elétrons, à dissipação regulada ou à dissipação não regulada. Nesse contexto, Phi2 e qL representam aspectos relacionados ao aproveitamento fotoquímico

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

da energia e à abertura dos centros de reação, enquanto PhiNPQ e PhiNO indicam as rotas de dissipação regulada e não regulada, respectivamente (Figura 1) (Baker, 2008; Johnson e Berry, 2021).

Aos 7 dias após a aplicação (DAA), o difenoconazol apresentou maior Phi2, acompanhado de valores elevados de qL. Esse comportamento é compatível com maior disponibilidade de centros de reação abertos e condições favoráveis ao transporte fotoquímico de elétrons. Embora esse padrão possa contribuir para o fornecimento de energia à assimilação de carbono, não é possível confirmar alterações na produção de ATP e NADPH ou na fixação de CO_2, uma vez que essas variáveis não foram mensuradas diretamente (Rios *et al*., 2018).

Em contraste, os menores valores de Phi2 e qL observados para mefentrifluconazol e tebuconazol, no mesmo período, sugerem menor aproveitamento fotoquímico da energia. Esse comportamento pode estar associado a maior limitação na transferência de elétrons e à necessidade de dissipação da energia absorvida. Entretanto, possíveis alterações no estado redox da cadeia transportadora, no conteúdo de plastoquinol e na formação de espécies reativas de oxigênio não podem ser confirmadas com base nas variáveis avaliadas.

A elevação pontual de PhiNO sob tebuconazol aos 3 DAA indica maior participação da dissipação não regulada naquele momento. Esse resultado pode representar menor capacidade de direcionamento da energia para processos fotoquímicos, sendo compatível com maior risco de fotoinibição. Contudo, não permite afirmar a ocorrência de danos ao PSII ou a formação de espécies reativas de oxigênio, pois esses processos não foram avaliados diretamente (Triantaphylidès e Havaux, 2009; Schneider *et al*., 2020).

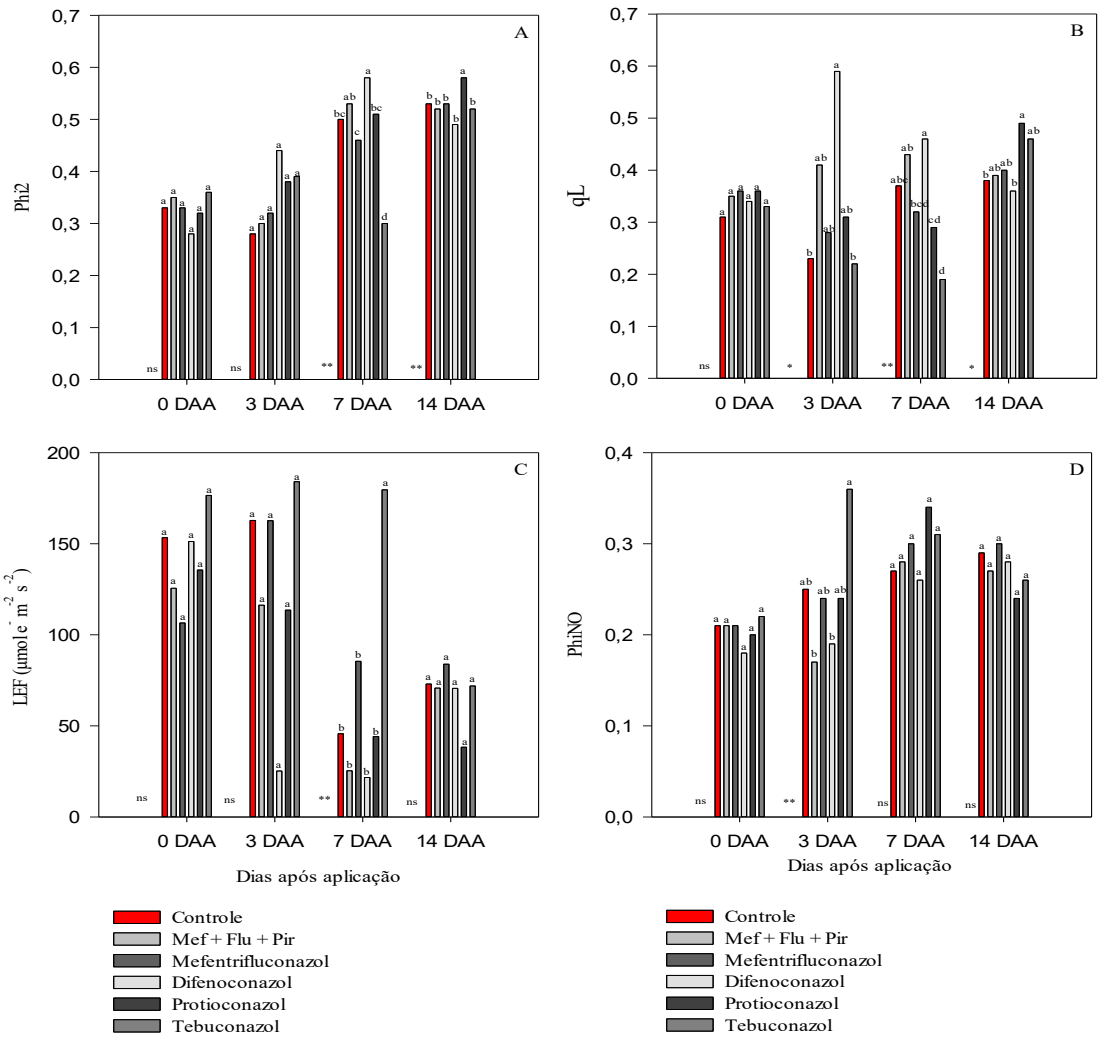
O comportamento do LEF aos 7 DAA indica que valores elevados de fluxo eletrônico não devem ser interpretados isoladamente como maior eficiência fotossintética. O transporte de elétrons pode não resultar proporcionalmente em assimilação de carbono, especialmente quando existem limitações em etapas subsequentes da fotossíntese. No presente estudo, entretanto, não foram realizadas medições de trocas gasosas, atividade da Rubisco, regeneração de RuBP ou utilização de trioses-fosfato; portanto, essas possibilidades devem ser consideradas apenas como hipóteses explicativas (Scafaro *et al*., 2023; Ye, 2025).

O tebuconazol apresentou valores mais elevados de PhiNPQ ao longo das avaliações, sugerindo maior direcionamento da energia para mecanismos regulados de dissipação. Esse padrão é compatível com maior demanda fotoprotetora, mas não comprova, isoladamente, a ocorrência de estresse oxidativo ou fotodano (Saneeva *et al*., 2022; Carvalho *et al*., 2025). De forma integrada, o difenoconazol apresentou, sobretudo aos 7 DAA, um padrão associado a maior aproveitamento fotoquímico da energia, enquanto o tebuconazol mostrou maior

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

participação das rotas dissipativas. Essas diferenças indicam respostas fotoquímicas específicas aos tratamentos, sem permitir a confirmação dos mecanismos bioquímicos subjacentes (Shikanai, 2023; Wang *et al*., 2022).

Figura 1. Parâmetros fotoquímicos do fotossistema II em plantas de soja submetidas à aplicação de triazóis na quarta aplicação do programa fungicida, avaliados aos 0, 3, 7 e 14 dias após a aplicação (DAA), incluindo (A) rendimento quântico efetivo do PSII (Phi2), (B) dissipação não fotoquímica regulada (PhiNPQ), (C) dissipação não regulada (PhiNO) e (D) fluxo linear de elétrons (LEF)



ns - não significativo; * - significativo a 5% de probabilidade; **: significativo a 1% de probabilidade. Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Andrade Silva, R; Ferreira, L.L. (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Os parâmetros de dissipação de energia, extravasamento de eletrólitos e temperatura foliar apresentaram respostas distintas entre os tratamentos e os períodos de avaliação, complementando as alterações fotoquímicas observadas anteriormente (Figura 2).

A dissipação total de energia não fotoquímica (NPQT) aumentou significativamente aos 7 DAA, com maior valor sob tebuconazol em relação ao protioconazol. Esse comportamento indica maior direcionamento da energia absorvida para vias dissipativas e pode estar relacionado à menor utilização fotoquímica naquele período (Baker, 2008; Hmimina *et al*., 2013). Embora mecanismos dependentes do gradiente de prótons e do ciclo das xantofilas possam participar dessa resposta, esses processos não foram mensurados diretamente no presente estudo (Saneeva *et al*., 2022; Johnson e Berry, 2021).

O PhiNPQ também apresentou diferenças significativas aos 7 e 14 DAA, com maiores valores sob tebuconazol. Esse padrão sugere maior participação da dissipação regulada e possível aumento da demanda fotoprotetora. Entretanto, não permite afirmar a ocorrência de estresse persistente, redução da síntese de ATP ou menor produção de fotoassimilados, uma vez que essas variáveis não foram avaliadas diretamente (Kanazawa *et al*., 2017; Carvalho *et al*., 2025).

O extravasamento de eletrólitos apresentou diferenças significativas em todas as avaliações, com maiores valores sob tebuconazol (Figura 2C). Por representar uma estimativa da permeabilidade das membranas, esse resultado é compatível com menor estabilidade celular nesse tratamento. A peroxidação lipídica e a formação de espécies reativas de oxigênio são mecanismos descritos na literatura como possíveis causas do aumento do extravasamento; contudo, sua ocorrência não pode ser confirmada sem medições bioquímicas específicas (Shahid *et al*., 2018; Santacroce *et al*., 2024).

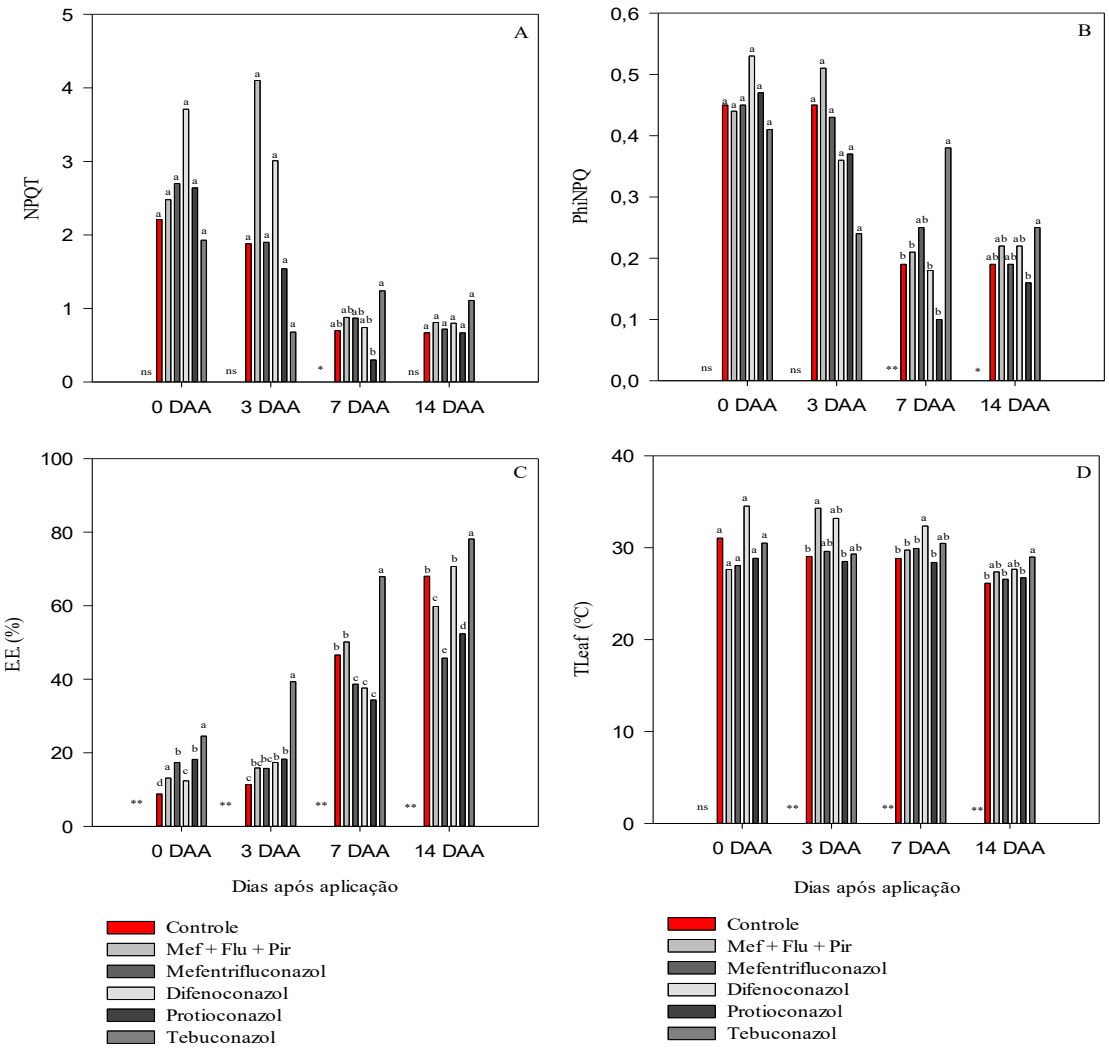
A redução do extravasamento observada aos 7 DAA em alguns tratamentos coincidiu com um período de maior precipitação e nebulosidade. Essa coincidência sugere possível influência das condições ambientais sobre as respostas fisiológicas, mas não permite estabelecer uma relação causal entre menor radiação, dissipação energética e estabilidade das membranas (Zheng *et al*., 2011; Fortunato *et al*., 2018).

A temperatura foliar apresentou diferenças significativas aos 3, 7 e 14 DAA, destacando-se o maior valor sob tebuconazol aos 14 DAA (Figura 2D). Essa resposta pode estar relacionada a alterações no balanço energético e na transpiração; entretanto, não é possível atribuí-la à redução da condutância estomática, pois as trocas gasosas não foram mensuradas (Nason *et al*., 2007). Em conjunto, os maiores valores de NPQT, PhiNPQ, extravasamento de eletrólitos e temperatura foliar sob tebuconazol indicam associação entre maior dissipação energética e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

menor estabilidade celular, sem permitir a confirmação dos mecanismos bioquímicos ou estomáticos envolvidos (Ahmad *et al*., 2021; Saneeva *et al*., 2022).

Figura 2. Parâmetros fisiológicos em plantas de soja submetidas à aplicação de triazóis na quarta aplicação do programa fungicida, avaliados aos 0, 3, 7 e 14 dias após a aplicação (DAA), incluindo (A) dissipação total de energia não fotoquímica (NPQT), (B) dissipação não fotoquímica regulada (PhiNPQ), (C) extravasamento de eletrólitos (E.E., %) e (D) temperatura foliar (TLeaf).



ns - não significativo; * - significativo a 5% de probabilidade; **: significativo a 1% de probabilidade. Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Andrade Silva, R; Ferreira, L.L. (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Os componentes de produção e qualidade dos grãos apresentaram respostas distintas entre os tratamentos (Figura 3). Embora essas variáveis representem o resultado acumulado do desenvolvimento da cultura, sua relação causal com os parâmetros fotoquímicos e a integridade celular deve ser interpretada com cautela.

O teor de óleo foi maior sob tebuconazol e menor sob mefentrifluconazol (Figura 3A). Esse comportamento demonstra diferenças na composição dos grãos, mas não permite afirmar que houve redirecionamento do metabolismo para a síntese de lipídios. Alterações na partição de carbono, na disponibilidade de acetil-CoA e na relação NADPH/ATP constituem possíveis explicações descritas na literatura, porém não foram avaliadas diretamente neste estudo (Aznar-Moreno *et al*., 2022; Kambhampati *et al*., 2021).

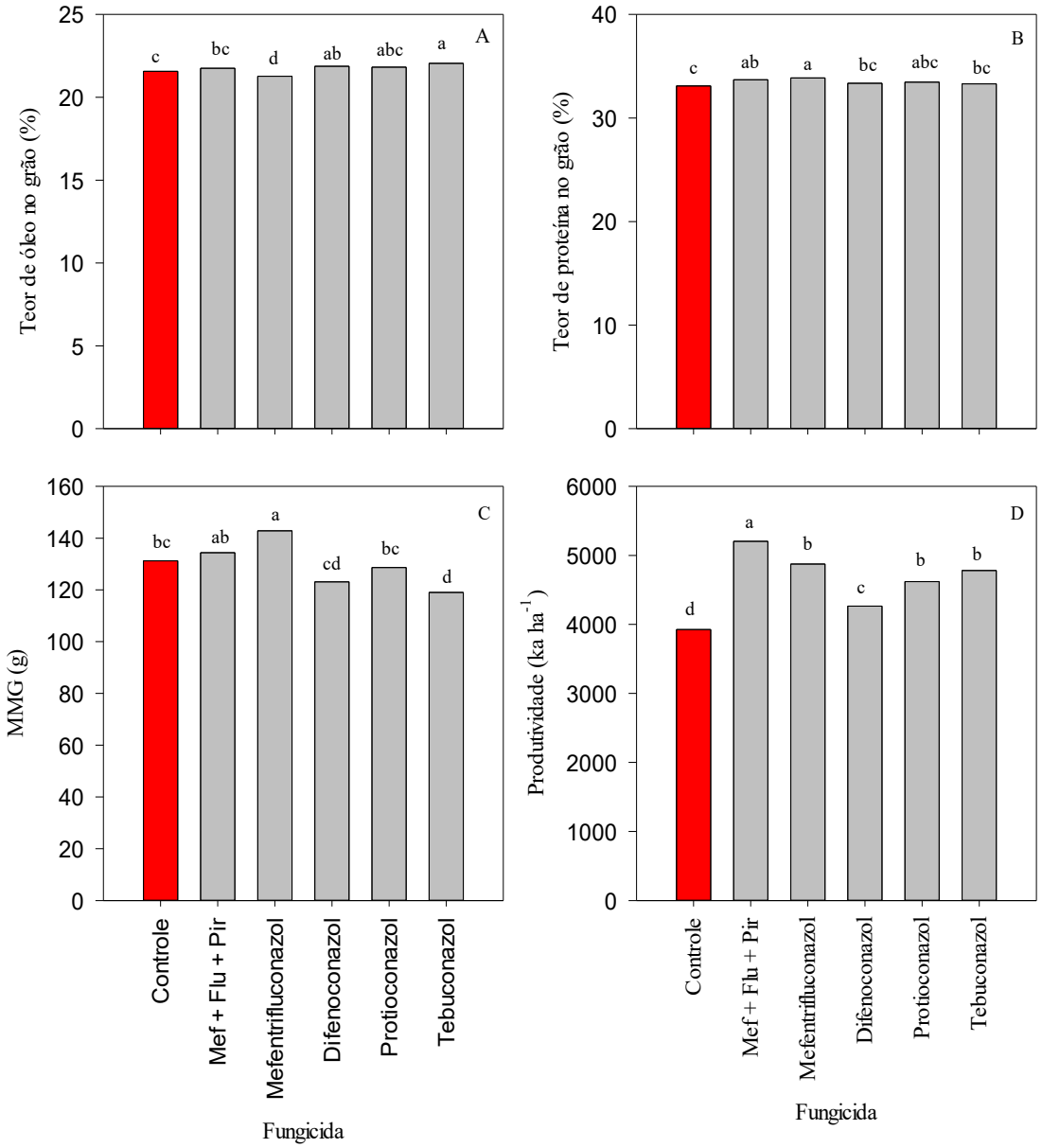
Em contraste, o maior teor de proteína foi observado sob mefentrifluconazol (Figura 3B). Esse resultado pode estar associado a diferenças na assimilação, remobilização ou incorporação de nitrogênio durante o enchimento dos grãos, mas não comprova maior atividade das enzimas envolvidas nesses processos. A relação inversa observada entre óleo e proteína é compatível com o padrão frequentemente descrito para a composição dos grãos; entretanto, os mecanismos metabólicos responsáveis por essa relação não foram mensurados (Joshi-Paneri *et al*., 2023; Zhang *et al*., 2020; Sun *et al*., 2025).

A massa de mil grãos foi maior sob mefentrifluconazol e menor sob tebuconazol e difenoconazol (Figura 3C). Esse padrão coincidiu, em parte, com diferenças observadas nos parâmetros fisiológicos, sugerindo possível associação entre o estado fisiológico das plantas e o enchimento dos grãos. Contudo, não é possível afirmar que houve maior translocação de fotoassimilados ou alteração na duração e na taxa de enchimento, pois esses processos não foram avaliados diretamente (Wang e Ort, 2023; Chen *et al*., 2024).

A maior produtividade foi observada com a mistura mefentrifluconazol + piraclostrobina + fluxapiroxade (Figura 3D). Esse resultado demonstra melhor desempenho agronômico da associação nas condições experimentais, mas não permite atribuí-lo a efeito sinérgico ou a um ingrediente ativo específico, uma vez que os componentes da mistura não foram avaliados em arranjo fatorial. Os tratamentos com moléculas isoladas apresentaram produtividade intermediária ou inferior. As coincidências entre produtividade, dissipação de energia, extravasamento de eletrólitos e temperatura foliar sugerem associação entre as respostas fisiológicas e produtivas, sem estabelecer relação direta de causa e efeito (Amaro *et al*., 2017; Nason *et al*., 2007; Ghaffar *et al*., 2023; Li *et al*., 2023).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 3. Componentes de produção e qualidade de grãos em plantas de soja submetidas à aplicação de diferentes triazóis na quarta aplicação do programa fungicida, incluindo (A) teor de óleo (B) teor de proteína, (C) massa de mil grãos (MMG), e (D) produtividade.



ns - não significativo; * - significativo a 5% de probabilidade; **: significativo a 1% de probabilidade. Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Andrade Silva, R; Ferreira, L.L. (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A análise de correlação de Pearson revelou associações entre as variáveis fotoquímicas, a integridade celular e os componentes produtivos (Figura 4). As correlações positivas de Phi2 e qL com produtividade e massa de mil grãos (MMG) indicam que maiores valores desses parâmetros ocorreram conjuntamente com melhor desempenho produtivo. Esse padrão é compatível com uma possível relação entre o aproveitamento fotoquímico da energia e o enchimento dos grãos, mas não permite estabelecer causalidade nem confirmar alterações na assimilação de carbono ou na produção de ATP e NADPH (Li *et al*., 2021; Ghaffar *et al*., 2023).

As correlações negativas de NPQT, PhiNPQ e temperatura foliar com produtividade e MMG demonstram que maiores valores dessas variáveis estiveram associados a menor desempenho produtivo. A dissipação de energia pode representar uma resposta fotoprotetora diante do excesso de energia absorvida; entretanto, os dados não permitem afirmar que ela tenha reduzido diretamente a fixação de carbono ou o acúmulo de biomassa (Berteotti *et al*., 2016; Saneeva *et al*., 2022). Da mesma forma, a relação entre temperatura foliar, condutância estomática e transpiração permanece hipotética, pois as trocas gasosas não foram mensuradas.

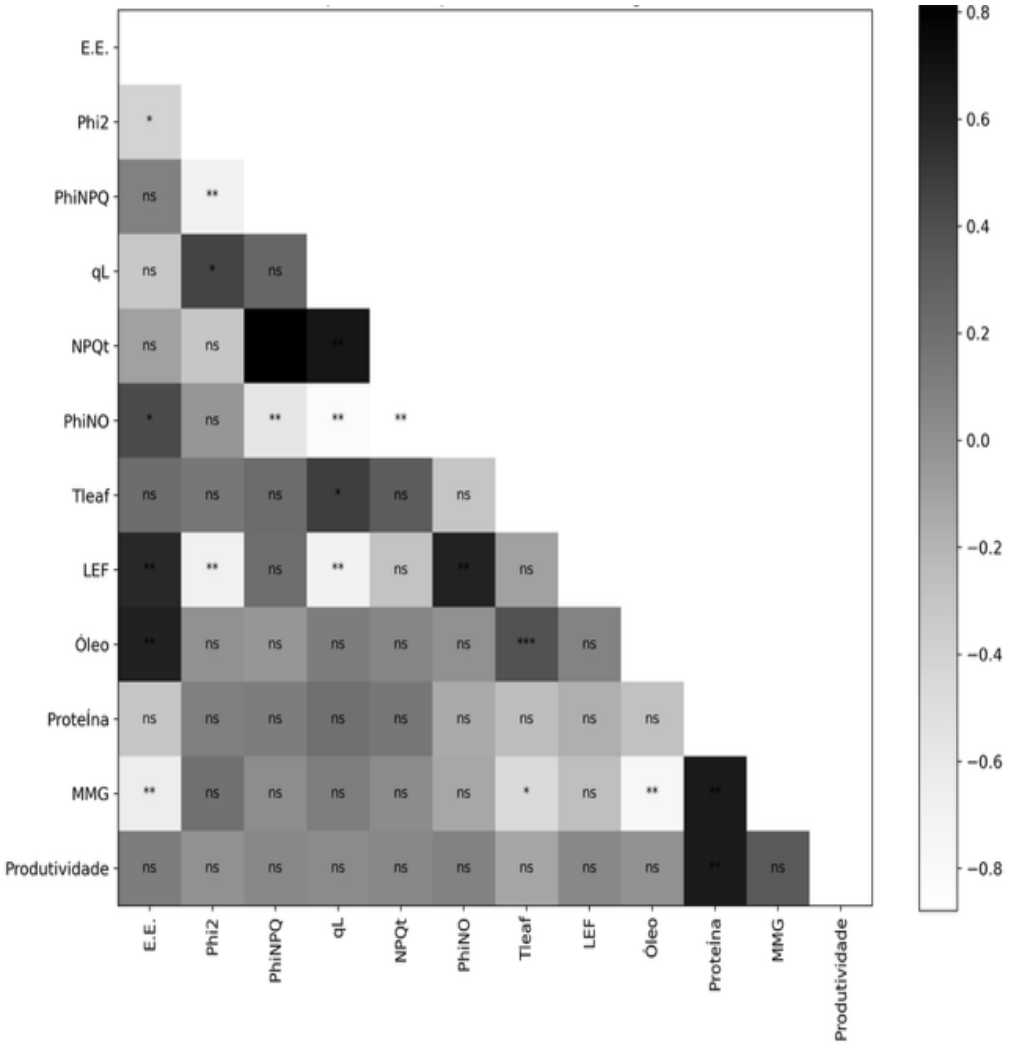
O extravasamento de eletrólitos apresentou correlação negativa com produtividade, MMG e teor de proteína. Essa associação indica que maiores valores de permeabilidade das membranas ocorreram conjuntamente com menores valores dessas características. Embora a integridade celular possa contribuir para a manutenção da atividade metabólica, não é possível atribuir esse padrão a alterações na redutase do nitrato, nas glutaminas sintetases ou na assimilação de nitrogênio, pois essas variáveis não foram avaliadas (Zayed *et al*., 2023; Joshi-Paneri *et al*., 2023).

O teor de óleo apresentou associações positivas com variáveis relacionadas à dissipação energética e à temperatura foliar. Esse resultado demonstra um padrão distinto daquele observado para o teor de proteína, mas não comprova o redirecionamento do metabolismo para a síntese de lipídios. Alterações no balanço entre carbono e nitrogênio constituem uma possível interpretação descrita na literatura, cuja confirmação exigiria medições metabólicas específicas (Voisin *et al*., 2016; Zhang *et al*., 2020; Kambhampati *et al*., 2021).

De forma integrada, o *heatmap* mostra que maiores valores de produtividade e proteína estiveram associados a maior Phi2 e qL e a menores valores de dissipação energética e extravasamento de eletrólitos. Essas correlações indicam a ocorrência conjunta de respostas fisiológicas e produtivas, mas devem ser interpretadas como associações dentro das condições experimentais, e não como evidência de relações diretas de causa e efeito (Wang e Ort, 2023; Chen *et al*., 2024).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 4. Heatmap de correlação de Pearson entre variáveis fisiológicas, bioenergéticas e produtivas em plantas de soja submetidas à aplicação de triazóis na quarta aplicação do programa fungicida, incluindo parâmetros fotoquímicos do fotossistema II (Phi2, PhiNPQ, PhiNO, qL e LEF), dissipação de energia (NPQT), extravasamento de eletrólitos (E.E.), variáveis bioenergéticas e ambientais (TLeaf) e componentes produtivos (MMG, teor de óleo e proteína e produtividade).



ns - não significativo; * - significativo a 5% de probabilidade; ** - significativo a 1% de probabilidade. Correlações significativas são indicadas pelos respectivos níveis de probabilidade.
Fonte: Andrade Silva, R; Ferreira, L.L. (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A análise econômica baseada no retorno sobre o investimento (ROI) considerou conjuntamente o incremento de produtividade e os custos dos tratamentos (Figura 5). Com o preço da soja fixado em R$ 112,00 por saca, observaram-se diferenças nos valores calculados entre os fungicidas. Esses resultados representam as condições econômicas adotadas no estudo e podem variar conforme o preço da soja, o custo dos produtos e a resposta produtiva obtida em outras condições.

O maior ROI foi observado para a mistura mefentrifluconazol + piraclostrobina + fluxapiroxade, com retorno de R$ 38,85 para cada real investido. Esse valor indica a melhor relação entre custo e incremento produtivo nas condições avaliadas. Entretanto, não permite atribuir o resultado a efeito sinérgico, maior proteção fitossanitária ou preservação da capacidade fotossintética, pois esses mecanismos não foram isolados pela análise econômica (Amaro *et al*., 2017; Ahmad *et al*., 2021).

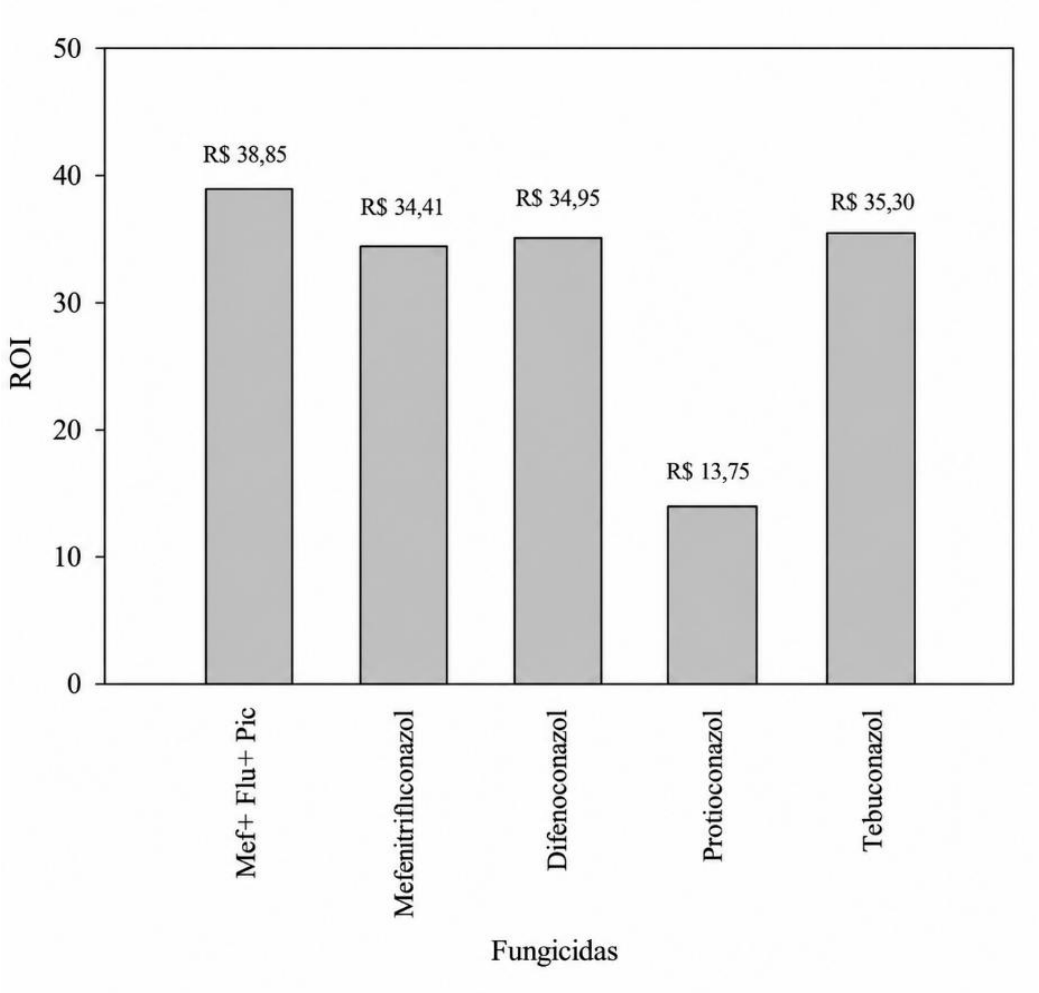
Os tratamentos com tebuconazol, difenoconazol e mefentrifluconazol apresentaram valores próximos de ROI, correspondentes a R$ 35,30, R$ 34,95 e R$ 34,41, respectivamente. Essa proximidade demonstra desempenho econômico semelhante nas condições de preço e custo consideradas. Embora tenham sido observadas diferenças fisiológicas entre esses tratamentos, não é possível afirmar que elas tenham determinado diretamente os respectivos retornos econômicos.

O tebuconazol apresentou ROI elevado mesmo sem superioridade consistente nos indicadores fisiológicos, sugerindo que seu resultado econômico esteve relacionado principalmente à combinação entre custo do tratamento e incremento produtivo. O protioconazol, por sua vez, apresentou o menor ROI, de R$ 13,75, indicando menor retorno relativo nas condições avaliadas. Isso demonstra que o ganho de produtividade deve ser interpretado conjuntamente com o custo do manejo.

De forma integrada, os valores de ROI mostram diferenças na relação entre investimento e retorno dos tratamentos. Contudo, por se tratar de uma análise descritiva baseada em preços e custos específicos, esses resultados não comprovam uma relação causal entre estabilidade fisiológica e rentabilidade nem devem ser extrapolados diretamente para outros cenários produtivos. Sua interpretação deve permanecer restrita às condições experimentais e econômicas consideradas no estudo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 5. Retorno sobre o investimento (ROI) de aplicações de fungicidas triazóis em plantas de soja submetidas à quarta aplicação do programa fitossanitário, considerando a produtividade, o incremento produtivo em relação à testemunha e o custo de aplicação dos tratamentos.



Fonte: Andrade Silva, R; Ferreira, L.L. (2026).

Em conjunto, os resultados indicam que os tratamentos fungicidas produziram respostas distintas nos parâmetros fotoquímicos, na integridade celular, nos componentes produtivos e no retorno econômico da soja. Maiores valores de eficiência fotoquímica e menores níveis de dissipação energética e extravasamento de eletrólitos estiveram associados a melhor desempenho produtivo em parte dos tratamentos. Em sentido oposto, maiores valores de dissipação, temperatura foliar e extravasamento ocorreram conjuntamente com respostas agronômicas menos favoráveis.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Essas associações sugerem uma possível relação entre o estado fisiológico das plantas e o desempenho produtivo, mas não comprovam relações diretas de causa e efeito nem os mecanismos bioquímicos envolvidos. Da mesma forma, os resultados econômicos dependeram da combinação entre produtividade, custos dos tratamentos e preço da soja, não podendo ser atribuídos exclusivamente às respostas fisiológicas.

Assim, os dados reforçam a importância de considerar, além da eficiência fitossanitária, as respostas fisiológicas, produtivas e econômicas associadas aos fungicidas. Entretanto, as conclusões devem permanecer restritas às condições experimentais avaliadas, e a confirmação dos mecanismos propostos requer estudos com medições bioquímicas e fisiológicas complementares.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os tratamentos fungicidas apresentaram respostas distintas nos parâmetros fotoquímicos, na integridade celular e no desempenho produtivo da soja. Maiores valores de eficiência fotoquímica e menores níveis de extravasamento de eletrólitos estiveram associados, em parte, a respostas agronômicas mais favoráveis. Nas condições avaliadas, a associação mefentrifluconazol + piraclostrobina + fluxapiroxade apresentou a maior produtividade e o maior retorno sobre o investimento. Contudo, o delineamento empregado não permite atribuir esse resultado a um ingrediente ativo específico nem confirmar uma relação causal entre as respostas fisiológicas e o desempenho econômico.

Os resultados estão restritos a uma safra, um local, uma cultivar e um programa fungicida específico. Portanto, sua extrapolação para outras condições de cultivo deve ser realizada com cautela. Estudos conduzidos em diferentes ambientes, safras, cultivares e programas de manejo, acompanhados de avaliações fisiológicas e bioquímicas complementares, são necessários para confirmar a consistência das respostas observadas.

REFERÊNCIAS

AGARIE, S.; HANAOKA, N.; KUBOTA, F.; AGATA, W.; KAUFMAN, P. B. Measurement of cell membrane stability evaluated by electrolyte leakage in rice. Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University, v. 40, p. 233–240, 1995.

AHMAD, I.; KAMRAN, M.; ALI, S.; BILEGJARGAL, B.; CAI, T.; AHMAD, S.; MENG, X.; SU, W.; LIU, T.; HAN, Q. Uniconazole application strategies to improve lignin biosynthesis, lodging

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

resistance and production of maize in semiarid regions. Field Crops Research, v. 263, 108076, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108076.

AMARO, A. C. E.; RAMOS, A. R. P.; MACEDO, A. C.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Effects of the fungicides azoxystrobin, pyraclostrobin and boscalid on the physiology of Japanese cucumber. Scientia Horticulturae, v. 228, p. 66–75, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.10.016.

AZNAR-MORENO, J. A.; MARTÍNEZ-FORCE, E.; VENEGAS-CALERÓN, M.; GARCÉS, R. Suppression of the SUGAR-DEPENDENT1 triacylglycerol lipase family during seed development enhances oil yield in oilseed rape (Brassica napus L.). Frontiers in Plant Science, v. 13, 863254, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.863254.

BAKER, N. R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. Annual Review of Plant Biology, v. 59, p. 89–113, 2008. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759.

BERTEOTTI, S.; CIORBA, P.; CAVALLINI, A. Non-photochemical quenching and yield in plants. Planta, v. 243, n. 5, p. 1079–1093, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/s00425-016-2470-3.

CARVALHO, M. E. A.; CASTRO, P. R. C.; AZEVEDO, R. A. Hormesis in plants under metal/metalloid stress: current understanding and future perspectives. Environmental and Experimental Botany, v. 211, 105371, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105371.

CHEN, L.; ZHANG, Y.; WANG, X. Source-sink dynamics and carbon partitioning during seed development in legumes. Journal of Experimental Botany, v. 75, n. 3, p. 789–803, 2024. DOI: https://doi.org/10.1093/jxb/erad456.

CROP PROTECTION NETWORK (CPN). Fungicide ROI Calculator Online Tool. Ames, IA: Crop Protection Network, 2026. DOI: https://doi.org/10.31274/cpn-20250323-0.

ELKHOLY, E. S.; SHALABY, A. A.; RAMADAN, M. M.; AL-SHURAYM, L. A.; SHUKRY, M.; ZHANG, Q.; AIOUB, A. A. A.; EL-HAMID, R. M. A. Dissipation of Triazole Residues and Their Impact on Quality Parameters and Nutrient Contents in Tomato Fruits and Products: From Farm to Table. Toxics, v. 14, n. 1, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/toxics14010020.

FORTUNATO, A. A.; RODRIGUES, F. A.; NASCIMENTO, K. J. T. Physiological and biochemical aspects of the resistance of banana plants to Fusarium wilt potentiated by silicon. Phytopathology, v. 108, n. 7, p. 900–907, 2018. DOI: https://doi.org/10.1094/PHYTO-11-17-0383-R.

GHAFFAR, A.; HUSSAIN, M.; ALI, M. PSII stability and agronomic performance in wheat under heat stress. Environmental and Experimental Botany, v. 205, 105123, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105123.

HMIMINA, G.; MERLIER, E.; DUFRÊNE, E.; SOUDANI, K. Relationship between photochemical reflectance index and leaf ecophysiological and biochemical parameters under two different water statuses: towards a rapid and non-destructive monitoring tool. Physiologia Plantarum, v. 147, n. 3, p. 339–351, 2013. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01665.x.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

JAKL, M.; KOVAČ, I.; ZELJKOVIĆ, S. C.; DYTRTOVÁ, J. J. Triazole fungicides in soil affect the yield of fruit, green biomass, and phenolics production of Solanum lycopersicum L. Food Chemistry, v. 351, n. 1, e129328, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129328.

JOHNSON, M. P.; BERRY, S. Principles of photoprotection in plants. Physiologia Plantarum, v. 171, n. 4, p. 539–548, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/ppl.13331.

JOSHI-PANERI, R.; BECKER, S.; LEVEY, M. Nitrogen assimilation and remobilization in crop plants: implications for yield and seed composition. Journal of Experimental Botany, v. 74, n. 2, p. 442–457, 2023. DOI: https://doi.org/10.1093/jxb/erac389.

KAMBHAMPATI, S.; AZNAR-MORENO, J. A.; HOSTETLER, C.; CASO, T.; BAILEY, S. R.; HUBBARD, A. H.; DURRETT, T. P.; ALLEN, D. K. On the inverse correlation of protein and oil: examining the effects of altered central carbon metabolism on seed composition in Arabidopsis. Plant Physiology, v. 186, n. 1, p. 98–112, 2021. DOI: https://doi.org/10.1093/PLPHYS/KIAB116.

KANAZAWA, A.; OSTENDORF, E.; KOHZUMA, K.; HOH, D.; STRAND, D. D.; SATO-CRUZ, M.; SAVAGE, L.; CRUZ, J. A.; FISHER, N.; FROEHLICH, J. E.; KRAMER, D. M. Chloroplast ATP synthase modulation of the thylakoid proton motive force: implications for photosystem I and photosystem II photoprotection. Frontiers in Plant Science, v. 8, p. 719, 2017. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00719.

LI, Y.; WANG, T.; LI, J.; AO, Y. Effect of phosphorus on chromium uptake, translocation, subcellular distribution and chemical forms in Leersia hexandra Swartz. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 207, 111279, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111279.

LI, Z.; WANG, Y.; ZHANG, J. Photosynthetic efficiency and crop productivity: from leaf to canopy. Plant Biotechnology Journal, v. 19, n. 1, p. 58–74, 2023. DOI: https://doi.org/10.1111/pbi.13443.

LIU, R.; LI, J.; ZHANG, L.; FENG, T.; ZHANG, Z.; ZHANG, B. Fungicide difenoconazole induced biochemical and physiological changes in plants. Plants, v. 10, n. 11, p. 2304, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/plants10112304.

NASON, M. A.; FARRAR, J.; BARTSCH, D. Strobilurin fungicides induce changes in photosynthetic gas exchange that do not improve water use efficiency of plants grown under conditions of water stress. Pest Management Science, v. 63, n. 12, p. 1191–1200, 2007. DOI: https://doi.org/10.1002/ps.1443.

PUROHIT, J.; CHATTOPADHYAY, A.; PATEL, D. S.; CHAUDHARI, S. M.; PATEL, K. K. Dual Role of Triazole Fungicides in Managing Alternaria Blight and Promoting Growth in Groundnut (Arachis hypogaea L.). Crops, v. 5, n. 5, 2025. Disponível em: https://www.mdpi.com/2673-7655/5/5/60. Acesso em: 20 jul. 2026.

RIOS, J. A.; RODRIGUES, F. A.; DEBONA, D.; SILVA, L. C. Photosynthetic gas exchange in leaves of wheat plants supplied with silicon and infected with Pyricularia oryzae. Acta Physiologiae Plantarum, v. 40, n. 4, p. 1–11, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s11738-018-2641-4.

SANEEVA, A. V.; ALLAKHVERDIEV, S. I.; GRISHINA, A. A. Mechanisms of non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence in higher plants. Biochemistry (Moscow), v. 87, n. 10, p. 1097–1114, 2022. DOI: https://doi.org/10.1134/S0006297922100108.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

SANTACROCE, F.; MARTI, L.; RIBERA-FONSECA, A.; JORBA, I.; CARRERAS, J. Proton motive force and ATP synthesis in plant mitochondria. Plant Physiology and Biochemistry, v. 206, 108234, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108234.

SCAFARO, A. P.; POSCH, B. C.; EVANS, J. R.; ATKIN, O. K. Rubisco deactivation and chloroplast electron transport rates co-limit photosynthesis above optimal leaf temperature in terrestrial plants. Nature Communications, v. 14, 38496, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-023-38496-4.

SCHNEIDER, T.; BOLGER, A.; ZEIER, J.; PREISKOWSKI, S.; BENES, V.; TRENKAMP, S.; USADEL, B.; FARRÉ, E. M.; MATSUBARA, S. Fluctuating light interacts with time of day and leaf development stage to reprogram gene expression. Plant Physiology, v. 179, n. 4, p. 1632–1657, 2020. DOI: https://doi.org/10.1104/pp.19.00574.

SHAHID, M.; AHMED, B.; ZAIDIA, A.; KHANA, M. S. Toxicity of fungicides to plants: oxidative stress and membrane damage. RSC Advances, 2018. DOI: https://doi.org/10.1039/C.

SHIKANAI, T. Regulation of photosynthetic electron transport. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics, v. 1864, n. 2, 148933, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bbabio.2022.148933.

SONG, L.; WANG, S.; ZOU, H.; YI, X.; JIA, S.; LI, R.; SONG, J. Regulation of Ergosterol Biosynthesis in Pathogenic Fungi: Opportunities for Therapeutic Development. Microorganisms, v. 13, n. 4, p. e862, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms13040862.

SUN, J.; LI, J.; WANG, M.; SONG, Z.; LIU, J.; HUANG, H. Mechanistic roles of GmSWEET10a/b and GmSUT1 in sugar transport from seed coat to embryo in soybean. The Plant Journal, v. 121, n. 1, e70435, 2025. DOI: https://doi.org/10.1111/tpj.70435.

THIND, T. S. Fungicides can impact physiological processes in plants. Agricultural Research Journal, v. 59, n. 1, p. 3-12, 2022. DOI: https://doi.org/10.5958/2395-146X.2022.00003.5.

TRIANTAPHYLIDÈS, C.; HAVAUX, M. Singlet oxygen in plants: production, detoxification and signaling. Trends in Plant Science, v. 14, n. 4, p. 219–228, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.01.008.

VOISIN, A. S.; SALON, C.; MUNIER-JOLAIN, N. G.; NEY, B. Quantitative effects of soil nitrate, growth potential and phenology on symbiotic nitrogen fixation of pea (Pisum sativum L.). Plant and Soil, v. 243, n. 1, p. 31–42, 2016. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1019967600932.

WANG, Y.; ORT, D. R. The role of pod photosynthesis in soybean seed filling. Plant, Cell & Environment, v. 46, n. 1, p. 195–208, 2023. DOI: https://doi.org/10.1111/pce.14476.

WANG, Y.; SELINSKI, J.; MAO, C.; ZHU, Y.; BERKOWITZ, O.; WHELAN, J. Linking mitochondrial and chloroplast retrograde signalling in plants. Philosophical Transactions of the Royal Society B, v. 377, n. 1864, 20210226, 2022. DOI: https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0226.

YE, Z.; HU, W.; ZHOU, S.; ROBAKOWSKI, P.; KANG, H.; AN, T.; WANG, F.; XIAO, Y.; YANG, X. Limitations of the Farquhar–von Caemmerer–Berry model and implications for photosynthetic electron transport and carbon assimilation. Biology, v. 14, n. 6, p. 630, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/biology14060630.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ZAYED, M.; ELKAFAFI, H.; ZEDAN, A. Oxidative stress and membrane integrity in plants under abiotic stress. Plant Stress, v. 9, 100175, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100175.

ZHANG, H.; GOETTEL, W.; SONG, Q.; JIANG, H.; HU, Z.; WANG, M. L.; AN, Y. C. Selection of GmSWEET39 for oil and protein improvement in soybean. PLoS Genetics, v. 16, n. 11, e1009114, 2020. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1009114.

ZHENG, Z.; QAMAR, S. A.; CHEN, Z.; MENGISTE, T. Arabidopsis WRKY33 transcription factor is required for resistance to necrotrophic fungal pathogens. The Plant Journal, v. 48, n. 4, p. 592–605, 2011. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2006.02901.x.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.