

ÍNDICES DE CLOROFILA COMO INDICADORES DA EFICIÊNCIA FISIOLÓGICA DO MANEJO DO NITROGÊNIO EM TRIGO

¹Alieze Nascimento da Silva, ²Daniela da Silva Oliveira, ²Bruna Holdefer
³Eveline Ferreira Soares, ⁴Claudir José Basso, ⁵Ionara Cristina Dickel, ⁶Thomas Henrique Wagner

¹ Docente da Universidade de Cruz Alta, UNICRUZ, *Campus* Cruz Alta, Brasil
mail: alieze.agro@gmail.com

²Discente da Universidade de Cruz Alta, UNICRUZ, *Campus* Cruz Alta, Brasil

³Doutoranda em Fitotecnia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, Brasil

⁴Docente na Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen, Brasil

⁵Mestranda em Agronomia - Agricultura e Ambiente na Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen, Brasil

⁶Discente em Agronomia no Instituto Federal Farroupilha, Campus Panambi, RS, Brasil

Recebido em: 15/01/2026 – Aprovado em: 02/03/2026 – Publicado em: 30/03/2026
DOI: 10.18677/EnciBio_2026A5

RESUMO

O manejo eficiente do nitrogênio (N) é um dos principais desafios agronômicos na cultura do trigo, em função do elevado custo dos fertilizantes minerais e das perdas associadas à volatilização, lixiviação e desnitrificação. Nesse contexto, indicadores fisiológicos, como os índices de clorofila, podem auxiliar na avaliação do estado nutricional e da eficiência do uso do N pelas plantas. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes estratégias de manejo do nitrogênio, incluindo fertilização mineral e uso de dejetos líquidos de bovinos, sobre os índices de clorofila, a eficiência fisiológica do N e a produtividade do trigo. O experimento foi conduzido em sistema de plantio direto, no município de Frederico Westphalen, RS, em Latossolo Vermelho distrófico, sob delineamento de blocos casualizados com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em testemunha sem N, fertilização mineral convencional (NPK) e aplicações de dejetos líquidos de bovinos em superfície ou via injeção, com ou sem inibidor de nitrificação (dicianodiamida). Os índices de clorofila foram determinados com clorofilômetro portátil, e o teor de N no tecido vegetal foi quantificado por método de Kjeldahl. As estratégias com dejetos líquidos de bovinos apresentaram maior eficiência fisiológica por unidade de N aplicada em comparação ao NPK, mantendo valores de clorofila semelhantes. A aplicação do dejetos via injeção associada ao inibidor de nitrificação resultou em maior absorção de N e maior produtividade de grãos. Os resultados indicam que a integração de índices de clorofila com indicadores de eficiência do uso do nitrogênio constitui ferramenta promissora para aprimorar o manejo da adubação nitrogenada em trigo.

PALAVRAS-CHAVE: Clorofila; eficiência do uso do nitrogênio; nutrição vegetal.

ABSTRACT

CHLOROPHYLL INDICES AS INDICATORS OF THE PHYSIOLOGICAL EFFICIENCY OF NITROGEN MANAGEMENT IN WHEAT

Efficient nitrogen (N) management is a major agronomic challenge in wheat production due to the high cost of mineral fertilizers and N losses through volatilization, leaching, and denitrification. In this context, physiological indicators such as chlorophyll indices can support the assessment of plant N status and nitrogen use efficiency. This study aimed to evaluate the effects of different nitrogen management strategies, including mineral fertilization and cattle slurry application, on chlorophyll indices, physiological N efficiency, and wheat grain yield. The experiment was conducted under a no-tillage system in Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brazil, on a dystrophic Red Latosol, using a randomized complete block design with four replications. Treatments included a control without N, conventional mineral fertilization (NPK), and cattle slurry applied either on the soil surface or by injection, with or without the nitrification inhibitor dicyandiamide. Chlorophyll indices were determined using a portable chlorophyll meter, and plant tissue N content was quantified by the Kjeldahl method. Cattle slurry treatments showed higher physiological efficiency per unit of applied N compared with mineral fertilization, while maintaining similar chlorophyll levels. Slurry injection combined with the nitrification inhibitor resulted in greater N uptake and higher grain yield. These results indicate that integrating chlorophyll indices with nitrogen use efficiency indicators is a promising approach to improve nitrogen management in wheat.

KEYWORDS: chlorophyll; nitrogen use efficiency; plant nutrition.

INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é um dos principais cereais cultivados no mundo, desempenhando papel estratégico na segurança alimentar global, especialmente em regiões de clima temperado e subtropical. No Brasil, embora as condições edafoclimáticas do Sul e Centro-Sul sejam favoráveis ao cultivo, a cultura ainda enfrenta limitações associadas ao elevado custo de produção, à instabilidade climática e à baixa eficiência do uso de insumos, com destaque para o nitrogênio (OHSE; ANTUNES, 2022). Nesse contexto, o manejo adequado da adubação nitrogenada constitui um dos principais desafios agrônômicos para maximizar a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas de produção de trigo.

O nitrogênio é o nutriente mineral requerido em maior quantidade pela cultura do trigo e está diretamente envolvido em processos fisiológicos fundamentais, como o crescimento vegetativo, a fotossíntese e a formação de grãos. Estima-se que mais de 50% do nitrogênio presente nas folhas esteja alocado em componentes do aparato fotossintético, especialmente na clorofila e em enzimas associadas à assimilação de carbono (NIINEMETS; SACK, 2006). Assim, variações no suprimento de nitrogênio refletem-se rapidamente na concentração de clorofila foliar, tornando esse atributo um indicador sensível do estado nutricional da planta e de sua capacidade fotossintética (KOKALY *et al.*, 2009; CROFT *et al.*, 2017).

Apesar de sua reconhecida importância agrônômica, a eficiência de uso do nitrogênio nos sistemas agrícolas permanece relativamente baixa. Em escala global, apenas cerca de um terço do nitrogênio aplicado é efetivamente absorvido pelas culturas, enquanto o restante é perdido por volatilização de amônia, lixiviação de nitrato ou emissão de gases de efeito estufa, como o óxido nitroso (PARK *et al.*,

2021; PENG *et al.*, 2023). Em sistemas de produção de trigo sob plantio direto, essas perdas podem ser intensificadas em função da aplicação superficial de fertilizantes minerais ou dejetos orgânicos, comprometendo tanto a eficiência agrônômica quanto o desempenho fisiológico das plantas (SILVA *et al.*, 2026).

A clorofila constitui um dos principais componentes do aparato fotossintético das plantas e apresenta relação direta com o estado nutricional nitrogenado, uma vez que grande parte do nitrogênio foliar encontra-se associado às proteínas envolvidas na captura e conversão da energia luminosa. Estudos recentes demonstram que a concentração de clorofila foliar é uma variável fisiológica altamente sensível às variações no suprimento de nitrogênio, exercendo papel central na determinação da produtividade do trigo, especialmente em ambientes com adequada disponibilidade hídrica (MOKHTARI *et al.*, 2025b). Esses autores evidenciaram que a clorofila apresenta maior capacidade explicativa do rendimento de grãos do que o estado hídrico da cultura, reforçando seu potencial como indicador fisiológico do manejo do nitrogênio.

Nesse contexto, o uso de indicadores fisiológicos capazes de diagnosticar, de forma rápida e não destrutiva, o estado nutricional nitrogenado das plantas tem ganhado destaque como ferramenta de apoio ao manejo da adubação. Entre esses indicadores, o índice relativo de clorofila, obtido por meio de clorofilômetros portáteis, como o SPAD, tem sido amplamente utilizado em diferentes culturas, incluindo o trigo, devido à sua praticidade, rapidez e relação com o teor de nitrogênio foliar (ARGENTA *et al.*, 2001; SINGH; ALI, 2020). O princípio de funcionamento desses equipamentos baseia-se na medição da transmitância da luz em comprimentos de onda específicos, permitindo estimar indiretamente a concentração de clorofila nas folhas.

Em trigo, leituras de SPAD têm apresentado elevada sensibilidade às doses e fontes de nitrogênio aplicadas, refletindo alterações fisiológicas no dossel ao longo do ciclo da cultura (MATTUELLA *et al.*, 2018; OHSE; ANTUNES, 2022). Entretanto, a eficiência desse índice como ferramenta de tomada de decisão depende fortemente do estágio fenológico avaliado, sendo mais consistente quando associado aos indicadores que integrem a resposta fisiológica da planta e a eficiência do uso do nutriente. Diversos estudos demonstram correlação significativa entre SPAD, teor de nitrogênio foliar e taxa fotossintética e, em determinados estádios fenológicos, com a produtividade de grãos (OHSE; ANTUNES, 2022; GAO *et al.*, 2024). Todavia, essa relação não é constante ao longo do ciclo da cultura, podendo variar conforme o estágio de desenvolvimento, a fonte e a dose de nitrogênio aplicada, bem como as condições ambientais (BERGER *et al.*, 2018; MU *et al.*, 2016).

Avanços recentes na agricultura de precisão e no monitoramento remoto reforçam a relevância da clorofila como variável-chave para a avaliação do desempenho fisiológico das culturas. Estudos baseados em sensoriamento proximal, imagens multiespectrais, hiperespectrais e veículos aéreos não tripulados demonstram que a estimativa da clorofila foliar apresenta elevada acurácia e estabilidade em diferentes estádios fenológicos do trigo (GAO *et al.*, 2024; AI *et al.*, 2025; HAN *et al.*, 2026). Nessas abordagens, a clorofila atua como elo integrador entre o manejo do nitrogênio, a atividade fotossintética e o potencial produtivo, especialmente quando associada aos modelos fisiológicos baseados na eficiência do uso da luz (MOKHTARI *et al.*, 2025a).

Além disso, estratégias de manejo do nitrogênio que aumentam a retenção no sistema solo-planta têm demonstrado efeitos positivos sobre a eficiência fisiológica do trigo. Em sistemas de plantio direto no Sul do Brasil, a aplicação de dejetos líquidos de bovinos via injeção, associada ao uso de inibidores de nitrificação, promoveu maior absorção de nitrogênio, aumento da eficiência do uso do nutriente e incrementos expressivos na produtividade de grãos (SILVA *et al.*, 2026). Esses resultados indicam que práticas de manejo capazes de melhorar a sincronização entre a disponibilidade de nitrogênio no solo e a demanda da cultura tendem a se refletir diretamente em melhorias no aparato fotossintético, reforçando o potencial dos índices de clorofila como indicadores da eficiência fisiológica do manejo nitrogenado.

Apesar da ampla utilização do índice relativo de clorofila como ferramenta de diagnose nitrogenada, sua interpretação isolada pode ser limitada, especialmente quando utilizada apenas como preditora direta de produtividade. Avaliações conduzidas por Ohse e Antunes (2022) demonstraram que, embora o índice SPAD aumente com o incremento das doses de nitrogênio, nem sempre apresenta correlação positiva com o rendimento de grãos, sobretudo em estágios fenológicos mais avançados. Esses resultados evidenciam a necessidade de abordagens integradas, nas quais os índices de clorofila sejam utilizados como indicadores da eficiência fisiológica do manejo do nitrogênio, e não apenas como estimativas pontuais do estado nutricional.

Diante desse cenário, o presente estudo parte da hipótese de que os índices de clorofila podem atuar como indicadores consistentes da eficiência fisiológica do manejo do nitrogênio em trigo, refletindo de forma integrada a nutrição nitrogenada, a atividade fotossintética e o potencial produtivo da cultura. A compreensão dessas relações é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes, sustentáveis e adaptadas às condições edafoclimáticas dos sistemas de produção de trigo.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em experimento de campo sob sistema de plantio direto, no município de Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil (27°23' S, 53°25' W; aproximadamente 566 m de altitude), em área representativa da triticultura do Sul do Brasil, sob clima subtropical úmido do tipo Cfa, conforme a classificação de Köppen. As condições meteorológicas ao longo do ciclo da cultura caracterizaram-se por temperaturas amenas e precipitação bem distribuída, favorecendo o desenvolvimento do trigo. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, apresentando textura média a argilosa, acidez moderada e histórico de uso agrícola contínuo, típico dos sistemas de produção de grãos da região. O experimento corresponde ao mesmo delineamento e conjunto de tratamentos previamente utilizados em estudo voltado à eficiência do uso do nitrogênio e à mitigação de perdas por volatilização, assegurando plena coerência experimental entre os trabalhos.

A cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.) foi conduzida sob sistema de plantio direto, utilizando-se cultivar adaptada às condições edafoclimáticas locais e recomendada para a região. A semeadura foi realizada em época adequada ao zoneamento agrícola, mantendo-se densidade de semeadura, espaçamento entre linhas e população de plantas uniformes em todas as parcelas experimentais. A

adubação de base seguiu as recomendações técnicas regionais para a cultura, considerando os resultados da análise química do solo realizada previamente à implantação do experimento, de modo a assegurar que as respostas observadas estivessem associadas predominantemente às estratégias de manejo do nitrogênio avaliadas.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, com quatro repetições. As parcelas experimentais foram constituídas por diferentes estratégias de manejo do nitrogênio, compreendendo: Testemunha sem aplicação de N; fertilização mineral convencional (NPK); aplicação de dejetos líquidos de bovinos (DLB) em superfície; aplicação de DLB em superfície associada à dicianodiamida (DCD); aplicação de DLB via injeção no solo; e aplicação de DLB via injeção associada à DCD. O dejetos líquidos de bovinos foi proveniente de sistema de produção leiteira, composto por fezes, urina, restos de alimentação e água de lavagem, sendo armazenado em esterqueira anaeróbia aberta. A aplicação do dejetos foi realizada em pré-semeadura, com volume ajustado para fornecer dose equivalente a 60 kg ha^{-1} de nitrogênio total. Nos tratamentos com fertilização mineral, a dose total de nitrogênio aplicada foi de 110 kg ha^{-1} , fracionada entre a semeadura e a adubação de cobertura, conforme a prática convencional adotada para a cultura do trigo na região.

A aplicação superficial do dejetos líquidos foi realizada de forma uniforme sobre a superfície do solo, enquanto a aplicação via injeção foi realizada com equipamento mecanizado específico, promovendo a deposição do material abaixo da superfície do solo e reduzindo o contato direto do fertilizante com a atmosfera. Nos tratamentos com uso de dicianodiamida, o inibidor de nitrificação foi misturado ao dejetos imediatamente antes da aplicação, na dose recomendada comercialmente, com o objetivo de retardar a oxidação do amônio a nitrato no solo, prolongar a permanência do nitrogênio na forma amoniacal e melhorar a sincronização com a demanda da cultura.

A avaliação do status nutricional e fisiológico das plantas foi realizada por meio da determinação indireta dos índices de clorofila foliar, utilizando-se clorofilômetro portátil da marca Falker, modelo ClorofiLOG® CFL 1030. O equipamento opera com base na leitura da transmitância da luz em comprimentos de onda específicos, permitindo estimar, de forma não destrutiva, os teores relativos de clorofila A, clorofila B e clorofila total nas folhas. As leituras foram realizadas em folhas completamente expandidas, localizadas no terço médio das plantas, em estágio fenológico correspondente ao máximo desenvolvimento vegetativo do trigo, conforme a escala de crescimento proposta por Large. Em cada parcela experimental foram realizadas múltiplas leituras em diferentes plantas, evitando-se nervuras centrais e bordaduras, sendo posteriormente calculada a média representativa da parcela.

Para a determinação do nitrogênio no tecido vegetal, amostras da parte aérea das plantas foram coletadas no estágio de florescimento, secas em estufa de circulação forçada de ar a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ até massa constante e moídas em moinho tipo Wiley. A quantificação do teor total de nitrogênio foi realizada em laboratório da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), por meio do método de digestão sulfúrica seguido de destilação e titulação, conforme o método de Kjeldahl, amplamente utilizado para análises de nitrogênio em tecidos vegetais. Os resultados foram expressos em g kg^{-1} de matéria seca, e o acúmulo de N foi obtido pela multiplicação do teor de N pela massa seca da parte aérea.

Os valores de clorofila A, clorofila B e clorofila total obtidos pelo clorofilômetro foram utilizados para o cálculo dos índices de eficiência fisiológica do manejo do nitrogênio, adotando-se a clorofila como variável integradora do estado nutricional e do desempenho fotossintético das plantas. Esses índices foram calculados parcela a parcela, dividindo-se os valores médios de clorofila pela dose total de nitrogênio aplicada em cada tratamento, resultando nos índices de clorofila total por kg de N aplicado, clorofila A por kg de N aplicado e clorofila B por kg de N aplicado, expressos em unidades de SPAD kg⁻¹ N ha⁻¹. A testemunha não foi incluída nesses cálculos por não ter recebido aplicação de nitrogênio, sendo utilizada apenas como referência fisiológica.

Adicionalmente, foram calculados índices relativos baseados na clorofila total, visando comparar a eficiência fisiológica dos tratamentos com menor aporte de nitrogênio em relação ao manejo mineral convencional e ao tratamento sem N. O índice relativo ao NPK foi obtido pela razão entre a clorofila total de cada tratamento e a clorofila total do tratamento NPK, expressa em porcentagem. O incremento fisiológico em relação à testemunha foi calculado a partir da diferença entre a clorofila total de cada tratamento e a clorofila total da testemunha, dividida pelo valor da testemunha e expressa em porcentagem. A eficiência fisiológica incremental do nitrogênio foi estimada pelo incremento absoluto de clorofila ($\Delta\text{SPAD} = \text{SPAD}_{\text{tratamento}} - \text{SPAD}_{\text{testemunha}}$) e pelo incremento relativo (%). O retorno fisiológico por unidade de nitrogênio aplicado foi obtido normalizando-se a clorofila total pela dose total de N aplicada em cada tratamento, sendo expresso como SPAD por 10 kg de N.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, considerando o delineamento experimental adotado. Quando constatada significância estatística para o efeito dos tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. As análises estatísticas foram realizadas em ambiente computacional apropriado, e os resultados foram expressos como médias acompanhadas de medidas de variabilidade, assegurando adequada interpretação agrônômica e fisiológica dos efeitos das estratégias de manejo do nitrogênio sobre os índices de clorofila, o teor de N no tecido vegetal e a produtividade do trigo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os índices de clorofila responderam de forma consistente às diferentes estratégias de manejo do nitrogênio (N) no cultivo de trigo, evidenciando alterações fisiológicas relevantes no aparato fotossintético das plantas. De modo geral, todos os tratamentos que receberam N apresentaram valores significativamente superiores à testemunha para clorofila A, clorofila B e clorofila total, confirmando a forte dependência desses pigmentos em relação ao suprimento nitrogenado, conforme amplamente descrito na literatura (ARGENTA *et al.*, 2001; CEROVIC *et al.*, 2012; OHSE; ANTUNES, 2022).

TABELA 1. Índices de clorofila A, clorofila B, clorofila total e relação A/B em trigo sob diferentes estratégias de manejo do nitrogênio.

Variável	Estratégia de manejo	Média ± EP (Tukey 5%)	CV (%)
Clorofila A	NPK	37,25 ± 0,32 a	1,73
	DLB Injetado	36,35 ± 0,85 a	4,67
	DLB Superfície	36,25 ± 1,02 a	5,65
	DLB Superfície + DCD	35,95 ± 0,25 a	1,39

	DLB Injetado + DCD	35,77 ± 0,47 a	2,60
	Testemunha	32,98 ± 0,77 b	4,70
Clorofila B	NPK	11,45 ± 0,19 a	3,24
	DLB Injetado + DCD	10,74 ± 0,33 a	6,07
	DLB Injetado	10,68 ± 0,31 a	5,73
	DLB Superfície + DCD	10,40 ± 0,17 a	3,18
	DLB Superfície	10,05 ± 0,12 b	2,34
	Testemunha	8,37 ± 0,50 c	11,92
Clorofila Total	NPK	48,70 ± 0,14 a	0,58
	DLB Injetado	47,03 ± 0,67 a	2,85
	DLB Injetado + DCD	46,51 ± 0,66 a	2,84
	DLB Superfície + DCD	46,35 ± 0,25 a	1,09
	DLB Superfície	46,31 ± 0,95 a	4,11
	Testemunha	41,35 ± 0,95 b	4,57
Relação Clorofila A/B	Testemunha	3,99 ± 0,28 a	13,83
	DLB Superfície	3,61 ± 0,13 a	7,35
	DLB Superfície + DCD	3,46 ± 0,07 a	3,77
	DLB Injetado	3,42 ± 0,17 a	9,74
	DLB Injetado + DCD	3,34 ± 0,09 a	5,68
	NPK	3,26 ± 0,08 b	5,02

Nota: Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. EP = erro padrão da média. CV = coeficiente de variação. DLB = dejetos líquidos de bovinos; DCD = dicianodiamida.

Para clorofila A, todos os tratamentos fertilizados apresentaram valores estatisticamente semelhantes entre si e superiores à testemunha (Tabela 1), indicando que tanto a fertilização mineral quanto as diferentes estratégias com dejetos líquidos de bovinos (DLB) foram suficientes para sustentar níveis adequados desse pigmento. Resultado semelhante foi observado para a clorofila total, cujos valores não diferiram entre o NPK e os tratamentos com DLB, independentemente do método de aplicação ou da adição de dicianodiamida (DCD), evidenciando a eficiência fisiológica das fontes orgânicas mesmo com menor aporte total de N.

Em contraste, a clorofila B apresentou maior sensibilidade para discriminar as estratégias de manejo (Tabela 1). O tratamento com NPK apresentou os maiores valores desse pigmento, diferindo do DLB aplicado em superfície, enquanto os demais tratamentos com DLB apresentaram valores intermediários. Essa resposta é fisiologicamente coerente, uma vez que a clorofila B está fortemente associada aos complexos coletores de luz (LHC), os quais tendem a responder de forma mais acentuada as variações na disponibilidade de N (EVANS, 1989; TAIZ *et al.*, 2017).

A relação clorofila A/B evidenciou diferenças adicionais no funcionamento do aparato fotossintético. O menor valor dessa relação observado no NPK indica maior investimento relativo em clorofila B, típico de condições de elevada disponibilidade de N, enquanto as maiores relações A/B nos tratamentos com DLB sugerem um

aparato fotossintético mais eficiente, com menor dependência de excesso nutricional (EVANS, 1989; TAIZ *et al.*, 2017).

Além das respostas fisiológicas associadas aos pigmentos fotossintéticos, as estratégias de manejo do nitrogênio influenciaram significativamente a produtividade, o acúmulo de biomassa, o estado nutricional e os índices clássicos de eficiência do uso do N, permitindo uma avaliação integrada entre desempenho fisiológico e agrônomo da cultura.

TABELA 2. Produtividade, estado nutricional e índices de eficiência do uso do nitrogênio em trigo sob diferentes estratégias de manejo

Estratégia de manejo	Produtividade (kg ha ⁻¹)	Massa seca (kg ha ⁻¹)	Acúmulo de N no florescimento (kg ha ⁻¹)	Teor de N na palha (g kg ⁻¹)	EAN ¹	RAN ² (%)	EF ³	EUN ⁴
Testemunh a	199 ± 3 d	2125 ± 90 d	20,25 ± 0,56 d	4,47 ± 0,23 d	0,60 d	5,44 d	7,95 d	2,06 d
NPK	543 ± 23 b	3259 ± 32 b	50,03 ± 2,05 c	6,58 ± 0,22 c	3,06 c	26,46 c	38,45 a	9,70 b
DLB superfície	507 ± 19 b	2927 ± 13 c	45,86 ± 2,68 c	6,77 ± 0,15 c	3,39 bc	25,42 c	32,45 b	7,73 c
DLB superfície + DCD	536 ± 22 b	3168 ± 24 b	56,82 ± 2,14 b	7,57 ± 0,12 b	3,75 b	31,38 b	31,16 b	9,33 b
DLB injetado	529 ± 18 b	3087 ± 35 bc	45,78 ± 1,22 c	7,11 ± 0,24 b	3,91 b	27,51 bc	35,39 ab	9,23 b
DLB injetado + DCD	586 ± 21 a	3355 ± 25 a	68,63 ± 0,88 a	8,85 ± 0,08 a	4,22 a	44,13 a	25,38 c	11,18 a

Valores expressos como média ± erro padrão da média.

Médias seguidas por **letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey (p ≤ 0,05)**. DLB = dejetos líquidos de bovinos; DCD = dicianodiamida. ¹EAN = eficiência agrônoma do N. ²RAN = recuperação aparente do N. ³EF = eficiência fisiológica do N. ⁴ EUN = eficiência do uso do nitrogênio.

A produtividade de grãos foi significativamente influenciada pelas estratégias de manejo do N (Tabela 2). O tratamento DLB injetado associado à DCD apresentou o maior rendimento, diferindo dos demais, enquanto os tratamentos fertilizados, de

modo geral, superaram amplamente a testemunha. Esse comportamento evidencia que estratégias que favorecem maior retenção e sincronização do N no sistema solo-planta tendem a resultar em melhor desempenho produtivo, conforme observado por Aita *et al.* (2018) e Silva *et al.* (2026).

O acúmulo de N no florescimento e o teor de N na palha seguiram tendência semelhante, com destaque novamente para o DLB injetado + DCD (Tabela 2). Esses resultados indicam maior absorção e incorporação do N em tecidos vegetais, refletindo não apenas o fornecimento direto do nutriente, mas também efeitos indiretos associados à melhoria da dinâmica do N no solo e à redução de perdas, conforme discutido por Ferreira *et al.* (2021) e Nicoloso *et al.* (2024). Os índices de eficiência agrônômica do N (EAN), recuperação aparente (RAN), eficiência fisiológica (EF) e eficiência do uso do nitrogênio (EUN) apresentaram diferenças marcantes entre as estratégias (Tabela 2). Destaca-se que tratamentos com DLB, especialmente quando associados à injeção e/ou à DCD, apresentaram valores elevados de RAN e EUN, corroborando evidências de que fontes orgânicas podem apresentar elevada eficiência do uso do N quando corretamente manejadas (GUTSER *et al.*, 2005; MEADE *et al.*, 2011; CASSIM *et al.*, 2024).

A utilização da clorofila como variável integradora permitiu avançar na interpretação fisiológica do manejo do N, por meio do cálculo de índices normalizados pela dose aplicada, os quais expressam o retorno fisiológico por unidade de nutriente fornecido.

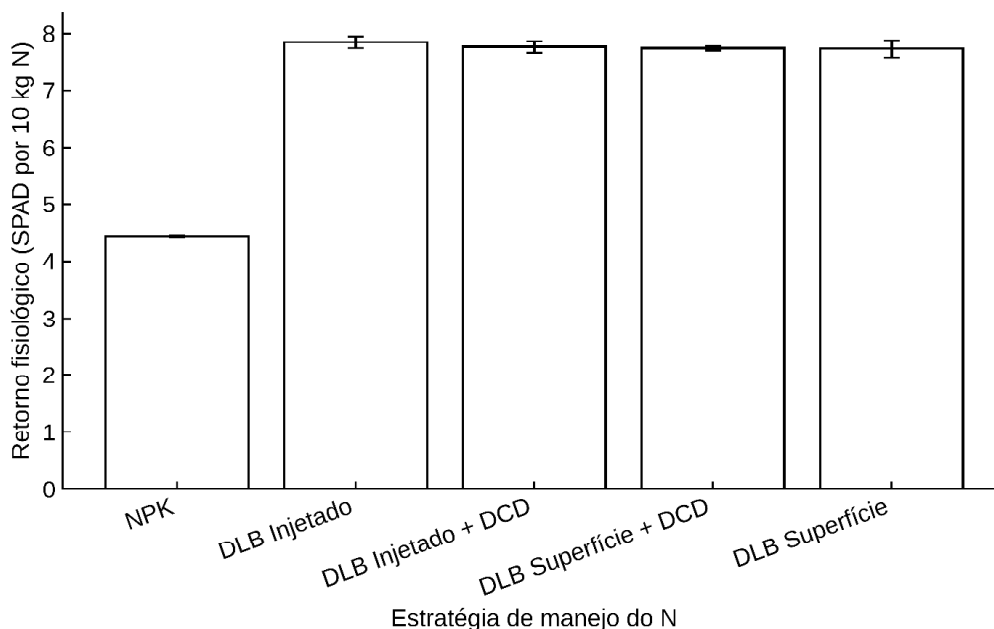
TABELA 3. Índices de eficiência fisiológica do manejo do nitrogênio em trigo, estimados a partir de clorofila por unidade de N aplicada.

Estratégia de manejo	N aplicado (kg ha ⁻¹)	Clorofila Total / kg N	Clorofila A / kg N	Clorofila B / kg N
DLB Injetado	60	0,78 a	0,61 a	0,18 a
DLB Injetado + DCD	60	0,78 a	0,60 a	0,18 a
DLB Superfície	60	0,77 a	0,60 a	0,17 a
DLB Superfície + DCD	60	0,77 a	0,60 a	0,17 a
NPK	110	0,44 b	0,34 b	0,10 b
Testemunha	0	—	—	—

Nota: Índices calculados por parcela experimental e submetidos à ANOVA em delineamento em blocos, com comparação de médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Testemunha não incluída na análise estatística por ausência de aplicação de N.

Os índices de clorofila por kg de N aplicado evidenciaram diferenças expressivas entre as fontes de N (Tabela 3). Todos os tratamentos com DLB apresentaram valores significativamente superiores de clorofila total, clorofila A e clorofila B por unidade de N quando comparados ao NPK. A eficiência fisiológica do manejo do N nos tratamentos com DLB foi aproximadamente 75–80% superior à observada no fertilizante mineral, independentemente do método de aplicação ou da adição de DCD. Esses resultados indicam que as estratégias com DLB promovem maior retorno fisiológico por unidade de N aplicada, refletindo maior capacidade da planta em converter o nutriente absorvido em aparato fotossintético funcional, conforme proposto por Fageria *et al.* (2008) e Cerovic *et al.* (2012).

FIGURA 1. Retorno fisiológico por unidade de nitrogênio aplicado, expresso como clorofila total (índice SPAD) por 10 kg de N, em plantas de trigo submetidas a diferentes estratégias de manejo do nitrogênio. As barras representam as médias e as hastes verticais o erro padrão da média. NPK = fertilização mineral convencional; DLB = dejetos líquidos de bovinos; DCD = dicianodiamida.



O retorno fisiológico por unidade de nitrogênio, expresso como clorofila total (SPAD) por 10 kg de N aplicado, reforça visualmente a superioridade das estratégias com DLB em relação ao NPK (Figura 1).

Enquanto o NPK apresentou os menores valores desse indicador, todos os tratamentos com DLB apresentaram retornos fisiológicos significativamente superiores, evidenciando maior eficiência do uso do N.

Esse comportamento é particularmente relevante sob a ótica da sustentabilidade, uma vez que indica a possibilidade de reduzir a dose total de N aplicada sem comprometer o funcionamento fisiológico da cultura, conforme discutido por Franzluebbbers (2020) e Cassim *et al.* (2024).

TABELA 4. Clorofila total relativa ao NPK e incremento fisiológico em relação à testemunha.

Estratégia de manejo	Clorofila Total (SPAD)	Relativo ao NPK (%)	Incremento vs Testemunha (%)
NPK	48,70	100,0	17,78
DLB Injetado	47,03	96,57	13,74
DLB Injetado + DCD	46,51	95,50	12,48
DLB Superfície + DCD	46,35	95,17	12,09
DLB Superfície	46,31	95,09	11,99
Testemunha	41,35	84,90	0,00

Os resultados demonstram que os índices de clorofila são ferramentas sensíveis para avaliar o estado fisiológico do trigo sob diferentes estratégias de manejo do N, corroborando o uso desses indicadores como *proxies* do *status* nitrogenado das plantas (BLACKMER; SCHEPERS, 1995; MARKWELL *et al.*, 1995; CEROVIC *et al.*, 2012). A ausência de diferenças significativas entre NPK e os tratamentos com DLB para clorofila A e clorofila total indica que o fornecimento de N via fontes orgânicas foi suficiente para sustentar níveis adequados de pigmentos fotossintéticos, mesmo com menor aporte total de N.

A maior sensibilidade da clorofila B em discriminar estratégias de manejo é fisiologicamente consistente, uma vez que esse pigmento está associado principalmente aos complexos coletores de luz (LHC), os quais tendem a responder de forma mais acentuada às variações na disponibilidade de N (EVANS, 1989; TAIZ *et al.*, 2017). Valores mais elevados de clorofila B, como observados no NPK, podem refletir maior investimento em estruturas de captura de luz sob condições de alta disponibilidade de N, enquanto relações A/B mais elevadas, como nos tratamentos com DLB, indicam um aparato fotossintético mais eficiente e menos dependente de excesso nutricional.

TABELA 5 –Retorno fisiológico e eficiência fisiológica incremental de nitrogênio em trigo

Estratégia de manejo	N aplicado (kg ha ⁻¹)	Clorofila total (SPAD)	SPAD por 10 kg de N	Incremento absoluto (SPAD)	Incremento relativo (%)
Testemunha	0	41,35	–	–	–
NPK	110	48,70	4,43	+7,35	+17,78
DLB superfície	60	46,31	7,72	+4,96	+11,99
DLB superfície + DCD	60	46,35	7,73	+5,00	+12,09
DLB injetado	60	47,03	7,84	+5,68	+13,74
DLB injetado + DCD	60	46,51	7,75	+5,16	+12,48

Os índices relativos de clorofila total reforçam a viabilidade agrônômica do uso de DLB como alternativa parcial ou total à adubação mineral nitrogenada (Tabela 4). Os tratamentos com DLB mantiveram valores de clorofila total entre 95 e 97% daqueles observados no NPK, apesar da aplicação de praticamente metade da dose de N.

O incremento fisiológico em relação à testemunha (Tabela 5) evidencia que todas as estratégias com N promoveram ganhos substanciais no estado fisiológico das plantas, com incrementos variando entre aproximadamente 12 e 18%. Esses resultados confirmam que a clorofila é um indicador sensível do ganho fisiológico associado ao fornecimento de N, embora, isoladamente, não seja suficiente para prever produtividade, conforme discutido por Ohse e Antunes (2022).

Em síntese, os resultados demonstram que a avaliação integrada de clorofila A, clorofila B, clorofila total, relação A/B e índices de eficiência fisiológica do N permite discriminar de forma robusta estratégias de manejo do nitrogênio em trigo. A superioridade dos tratamentos com DLB em termos de eficiência fisiológica por unidade de N aplicada reforça que a clorofila reflete não apenas o *status* nutricional

momentâneo, mas também a capacidade de remobilização e aproveitamento do N ao longo do ciclo, conforme observado em cultivares brasileiras de trigo por Silva *et al.* (2014a,b). Essa abordagem amplia a base fisiológica para recomendações de manejo mais eficientes e ambientalmente sustentáveis.

CONCLUSÃO

As estratégias de manejo do nitrogênio influenciaram de forma significativa o estado fisiológico, a eficiência de uso do nutriente e a produtividade do trigo, evidenciando que a resposta da cultura está fortemente condicionada não apenas à dose aplicada, mas à forma de fornecimento e à dinâmica do nitrogênio no sistema solo-planta. A utilização de índices de clorofila permitiu identificar diferenças fisiológicas relevantes entre os tratamentos, confirmando seu potencial como ferramenta sensível para avaliar o desempenho fotossintético associado ao manejo nitrogenado.

Os tratamentos com dejetos líquidos de bovinos apresentaram maior eficiência fisiológica por unidade de nitrogênio aplicada em comparação à fertilização mineral convencional, mesmo quando utilizadas doses totais inferiores de N. Em especial, a aplicação de dejetos via injeção, associada ao uso de inibidor de nitrificação, promoveu maior absorção de nitrogênio, maiores teores de N no tecido vegetal e maior produtividade de grãos, evidenciando melhor sincronização entre a disponibilidade do nutriente e a demanda da cultura.

A análise integrada dos índices de clorofila, do estado nutricional e dos indicadores agronômicos demonstrou que a clorofila não deve ser interpretada apenas como um indicador pontual do estado nutricional, mas como uma variável integradora da eficiência fisiológica do manejo do nitrogênio. Assim, a associação entre leituras de clorofila e índices de eficiência do uso do N representa uma abordagem promissora para aprimorar a recomendação da adubação nitrogenada em trigo, contribuindo para o aumento da produtividade, a redução das perdas de nitrogênio e a maior sustentabilidade dos sistemas de produção.

REFERÊNCIAS

AI, W.; YANG, G.; LI, H.; DU, J.; YE, X.; FENG, X.; JIN, X.; HE, Y. Estimation of SPAD values and chlorophyll content in winter wheat using UAV multispectral imagery and texture features. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 9, p. 1–12, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2025.100123>.

AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; HUNSCHE, L. R.; BENETTI, A. E.; GIACOMINI, D. A. Nitrous oxide emissions in a wheat/corn succession combining dairy slurry and urea as nitrogen sources. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, e0170122, 2018.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; BORTOLINI, C. G. Clorofila na folha como indicador do nível de nitrogênio em cereais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 4, p. 715–722, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782001000400026>.

BERGER, K.; VERRELST, J.; FERET, J. B.; WANG, Z.; WOOLLEY, J. T.; *et al.* Crop nitrogen monitoring: recent progress and future perspectives using hyperspectral remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 218, p. 65–82, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.018>. doi: 10.1016/j.rse.2018.09.018.

BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S. Use of a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertilization of corn. **Journal of Production Agriculture**, v. 8, p. 56–60, 1995.

CASSIM, B. M. A. R.; LISBOA, I. P.; BESEN, M. R.; OTTO, R.; CANTARELLA, H. Nitrogen: from discovery, plant assimilation, sustainable usage to current enhanced efficiency fertilizer technologies. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, e0230037, 2024.

CEROVIC, Z. G.; MASDOUDE, M.; GHOZLEN, N. B.; LATRILLE, E. Using optical sensors to estimate leaf nitrogen content and photosynthetic capacity in crop plants. **Field Crops Research**, v. 128, p. 77–90, 2012.

CROFT, H.; CHEN, J. M.; LUO, X.; BARTLETT, P.; CHEN, B.; *et al.* Leaf chlorophyll content as a proxy for photosynthetic capacity. **Global Change Biology**, Hoboken, v. 23, n. 9, p. 3513–3524, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.13599>. doi: 10.1111/gcb.13599.

EVANS, J. R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. **Oecologia**, v. 78, p. 9–19, 1989.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; LI, Y. C.; HE, Z. L.; BARBOSA FILHO, M. P. The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty first century. **Journal of Plant Nutrition**, v. 31, p. 1121–1157, 2008.

FERREIRA, G. W.; BENEDET, L.; TRAPP, T.; LIMA, A. P.; JUNIOR, V. M.; LOSS, A.; LOURENZI, C. R.; COMIN, J. J. Soil aggregation indexes and chemical and physical attributes of aggregates in a Typic Hapludult fertilized with swine manure and mineral fertilizer. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 10, n. 1, 2021.

FRANZLUEBBERS, A. J. Soil-test biological activity with the flush of CO₂ : validation of nitrogen prediction for corn production. **Agronomy Journal**, v. 112, e20094, 2020.

GAO, G.; ZHANG, L.; WU, L.; YUAN, D. Optimization of hyperspectral vegetation indices for estimating leaf chlorophyll content of wheat at different growth stages. **Applied Sciences**, Basel, v. 14, n. 3, p. 703, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app14030703>.

GUTSER, R.; EBERTSEDER, T.; WEBER, A.; SCHRAML, M.; SCHMIDHALTER, U. Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 168, p. 439–446, 2005.

HAN, D.; ZHANG, W.; ZAIN, M.; WANG, J.; ZHU, S.; ZHAO, Y.; LIU, T.; SUN, C.; GUO, W. UAV hyperspectral remote sensing for wheat CSPAD estimation model based on fusion of spectral parameters. **Agronomy**, v 16, n. 4, 430. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy16040430>.

KOKALY, R. F.; CLARK, R. N.; SWAYZE, G. A.; LUSHER, J. P.; HOEFS, J.; *et al.* Spectroscopic determination of leaf biochemical and biophysical traits relevant to vegetation monitoring. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, Washington, v. 114, n. G00E03, p. 1–24, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2008JG000884>. doi: 10.1029/2008JG000884.

MARKWELL, J.; OSTERMAN, J. C.; MITCHELL, J. L. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*, v. 46, p. 467–472, 1995.

MATTUELLA, D.; SIMIONI, S. P.; SEGATTO, C.; CIGEL, C.; ADAMS, C. R.; KLEIN, C.; LAJÚS, C. R.; SORDI, A. Eficiência agrônômica da cultura do trigo submetida a doses de nitrogênio em diferentes estádios ontogênicos. *Ciência Agrícola*, Rio Largo, v. 16, n. 3, p. 1–9, 2018. Disponível em: <http://www.seer.ufal.br/index.php/agricola/article/view/1023>.

MEADE, G.; LALOR, S. T. J.; MCCABE, T.; O'DONOVAN, J.; HENNESSY, D. An evaluation of the combined usage of separated liquid pig manure and inorganic fertiliser in nutrient programmes for winter wheat production. *European Journal of Agronomy*, v. 34, p. 62–70, 2011.

MOKHTARI, A.; YANG, H.; CROFT, H.; LUCA, S. V.; LI, F.; *et al.* Satellite-based winter wheat yield estimation with a newly parameterized LUE model based on crop water status and leaf chlorophyll content. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 333, p. 110106, 2025a. DOI: 10.1016/j.fcr.2025.110106. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429025003715>. Acesso em: 4 fev. 2026.

MOKHTARI, A.; YANG, H.; CROFT, H.; LUCA, S. V.; LI, F.; MINCEVA, M.; SCHMIDHALTER, U.; YU, K. Relative importance of crop water stress and chlorophyll content in determining winter wheat yield under adequate water conditions. *Field Crops Research, Amsterdam*, v. 318, p. 109013, 2025b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109013>.

MU, X.; CHEN, Q.; CHEN, F.; YUAN, L.; MI, G. Within-leaf nitrogen allocation in adaptation to low nitrogen supply in maize during grain-filling stage. *Frontiers in Plant Science*, v. 7, 194737, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00699>.

NIINEMETS, Ü.; SACK, L. Structural determinants of leaf light-harvesting capacity and their implications for photosynthetic performance. *Progress in Botany*, Cham, v. 67, p. 385–419, 2006. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-34504-1_15. Acesso em: 6 fev. 2026.

NICOLOSO, R. da S.; BARROS, E. C.; WUADEN, C. R. Eficiência agrônômica dos dejetos de suínos como fonte de nitrogênio para o milho. *Embrapa Suínos e Aves. Comunicado Técnico*, 622, 2024. 9p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1166954>. Acesso em: 2 fev. 2026.

OHSE, S.; ANTUNES, J. C. G. Índice relativo de clorofila e componentes da produção do trigo em função de fontes e doses de nitrogênio. **Revista Thêma et Scientia**, Cascavel, v. 12, n. 2, p. 260–273, 2022. Disponível em: <https://themaetscientia.fag.edu.br/index.php/RTES/article/view/1338>. Acesso em: 4 fev. 2026.

PARK, S.; KIM, H.; LEE, J.; SHIN, J.; KIM, S.; *et al.* Global nitrogen use efficiency in cropland systems: trends, drivers and mitigation strategies. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 190, p. 103101, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103101>. doi: 10.1016/j.agsy.2021.103101.

PENG, Y.; LI, C.; FANG, Y.; ZHANG, F.; CUI, Z.; *et al.* Improving nitrogen use efficiency and reducing nitrogen losses in global cropping systems. *Science of the Total Environment*, Amsterdam, v. 856, p. 159093, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159093>. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159093.

SILVA, A. N.; SOARES, E. F.; BASSO, C. J. Improving nitrogen efficiency and reducing ammonia emissions in wheat: a strategy using cattle slurry and dicyandiamide. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 56, e83428, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-40632026v5683428>.

SILVA, C. L.; BENIN, G.; BORNHOFEN, E.; BECHE, E.; TODESCHINI, M. H.; *et al.* Nitrogen use efficiency is associated with chlorophyll content in Brazilian spring wheat. **Australian Journal of Crop Science**, Lismore, v. 8, n. 6, p. 957–964, 2014a. Disponível em: https://www.cropj.com/silva_8_6_2014_957_964.pdf. Acesso em: 4 fev. 2026. QUAL ESTÁ NO TEXTO? Este?

SILVA, C. L.; BENIN, G.; BORNHOFEN, E.; TODESCHINI, M. H.; DALLO, S. C.; *et al.* Characterization of Brazilian wheat cultivars in terms of nitrogen use efficiency. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 2, p. 1–10, 2014b. DOI: 10.1590/brag.2014.012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/>. Acesso em: 4 fev. 2026. OU ESTE?

SINGH, B.; ALI, A. M. Using hand-held chlorophyll meters and canopy reflectance sensors for fertilizer nitrogen management in cereals in small farms in developing countries. **Sensors**, v. 20, n. 4, 1127, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s20041127>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.