



**INTERAÇÃO NITROGÊNIO E ENXOFRE NA CULTURA DO TRIGO CULTIVADA
NO CERRADO**

*INTERACTION OF NITROGEN AND SULFUR IN WHEAT CROPS CULTIVATED IN
THE CERRADO*

Thiago Henrique Ferreira Matos Castañon

Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá - MT, Brasil

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2186-0678>

E-mail: thiagocastanon@live.com

Edna Maria Bonfim-Silva

Universidade Federal de Rondonópolis, Rondonópolis - MT, Brasil

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1989-8431>

E-mail: embonfim@hotmail.com

Tonny José Araújo da Silva

Universidade Federal de Rondonópolis, Rondonópolis - MT, Brasil

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6978-7652>

E-mail: tonnyjasilva@gmail.com

William Fenner

Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá - MT, Brasil

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3463-9457>

E-mail: fennerwilliam@gmail.com

Magnun Antonio Penariol da Silva

Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém - PA, Brasil

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5856-0209>

E-mail: magnun.penariol@ufra.edu.br

Rosana Andréia da Silva Rocha

Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá - MT, Brasil

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9072-3776>

E-mail: rocharosana890@gmail.com

Submetido: 25 mar. 2025

Aprovado: 15 abr. 2026

Publicado: 4 maio 2026

E-mail para correspondência:

embonfim@hotmail.com



Resumo: A produtividade e a qualidade do trigo podem ser influenciadas pela nutrição de plantas, sendo a interação entre nitrogênio e enxofre importantes na melhoria da qualidade da cultura. Objetivou-se verificar o efeito da interação entre nitrogênio e enxofre no desempenho agrônomo e na qualidade tecnológica do trigo irrigado em condições do Cerrado do Estado de Mato Grosso. O experimento foi instalado em área experimental da Universidade Federal de Rondonópolis. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições. As doses de nitrogênio (N) testadas foram 0, 70, 140, 210 e 280 kg ha⁻¹, e as doses de enxofre (S) foram 0, 25, 50, 75 e 100 kg ha⁻¹, totalizando 13 tratamentos através das combinações entre os 2 nutrientes. As variáveis analisadas foram referentes ao desempenho agrônomo e qualidade tecnológica dos grãos. O modelo de superfície de resposta e os termos (linear, quadrático e interação) foram avaliados por meio da análise de variância (ANOVA) e da verificação da falta de ajuste (Lack of fit), utilizando o teste F ($p < 0,05$). Nos casos em que os critérios de seleção do modelo de superfície de resposta não foram atendidos, foram estudados os efeitos isolados e interação dos fatores, utilizando a análise de regressão polinomial. Para a significância dos efeitos, foram considerados o teste F ($p < 0,05$) da ANOVA e o teste t de Student ($p < 0,05$). O desempenho agrônomo e a qualidade tecnológica do trigo irrigado cultivado sob condições do Cerrado são influenciados pelas doses de nitrogênio entre 176 a 280 kg ha⁻¹ e enxofre entre 38 à 100 kg ha⁻¹.

Palavras-chave: *Triticum aestivum*. Relação N:S. Produtividade do trigo. Composição proteica do grão. Trigo irrigado.

Abstract: Wheat productivity and quality can be influenced by plant nutrition, and the interaction between nutrients can be synergistic or antagonistic, especially in the interaction between nitrogen and sulfur. The objective of this study was to verify the effect of the interaction between nitrogen and sulfur on the agronomic performance and technological quality of irrigated wheat in Cerrado conditions. The experiment was installed in an experimental area at the Federal University of Rondonópolis. The experimental design was in randomized blocks, with four replications. The nitrogen (N) doses tested were 0, 70, 140, 210 and 280 kg ha⁻¹, and the sulfur (S) doses were 0, 25, 50, 75 and 100 kg ha⁻¹, totaling 13 treatments across the combinations between the 2 nutrients. The variables analyzed referred to the agronomic performance and technological quality of the grains. The response surface model and terms (linear, quadratic and interaction) were evaluated using analysis of variance (ANOVA) and checking for lack of fit (Lack of fit), using the F test ($p < 0.05$). In cases where the response surface model selection criteria were not met, the isolated effects and interaction of factors were analyzed using polynomial regression analysis. For the significance of the effects, the ANOVA F test ($p < 0.05$) and the Student's t test ($p < 0.05$) were considered. The agronomic performance and technological quality of irrigated wheat grown under Cerrado conditions are influenced by nitrogen doses between 176 and 280 kg ha⁻¹ and sulfur between 38 and 100 kg ha⁻¹.

Keywords: *Triticum aestivum*. N:S ratio. Wheat productivity. Grain protein composition. Irrigated wheat.



Introdução

A interação entre os nutrientes pode resultar em sinergismo ou antagonismo, sendo a relação entre nitrogênio (N) e enxofre (S) particularmente estreita, já que a concentração de uma influencia diretamente o metabolismo do outro ⁽¹⁾. De acordo com Malavolta e Moraes ⁽²⁾, a deficiência de enxofre, mesmo com nitrogênio em níveis adequados, reduz a eficiência de nitrogênio pela planta, causando o acúmulo de compostos não proteicos. Por outro lado, quando há fornecimento adequado de enxofre, mas deficiência de nitrogênio, o metabolismo do enxofre é comprometido, resultando em menor síntese de aminoácidos e proteínas.

O Brasil depende amplamente da importação de trigo, principalmente de países da América do Sul ⁽³⁾. Nesse contexto, a expansão da produção nacional é essencial para alcançar a autossuficiência. Entre as cultivares de trigo desenvolvidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), a BRS 394 destaca-se por sua adaptação às condições do Cerrado, aliada ao alto potencial produtivo e boa qualidade tecnológica dos grãos ⁽⁴⁾.

A produtividade e qualidade do trigo são fortemente influenciadas pelo estado nutricional das plantas, sendo o nitrogênio e o enxofre os nutrientes mais limitantes para essas características. O equilíbrio fornecido desses elementos é fundamental para maximizar o desempenho da cultura ⁽⁵⁾. O nitrogênio, embora essencial, pode causar o acamamento das plantas quando aplicado em excesso, o que reduz a produtividade e a qualidade dos grãos ^(6,7). Já o enxofre, predominantemente presente na matéria orgânica do solo ⁽⁸⁾, precisa ser oxidado para formar sulfato e se tornar disponível para as plantas. Esse processo é mediado por microrganismos e depende de fatores como temperatura, aeração e pH do solo ⁽⁹⁾.

Solos brasileiros, como os Latossolos e Argissolos, possuem bom potencial para a oxidação do enxofre elementar, o que viabiliza o uso de fertilizantes com essa forma de enxofre ⁽¹⁰⁾. Para garantir boas produtividades, o trigo necessita de uma adubação de base complementar, a qual impacta positivamente na produtividade dos grãos, no número de filhos férteis e na altura das plantas ⁽¹¹⁾.

Embora a importância individual do nitrogênio e do enxofre seja bem estabelecida, há poucas pesquisas sobre os efeitos das interações entre esses nutrientes na cultura do trigo. Dessa forma, hipotetiza-se que o fornecimento equilibrado de nitrogênio e enxofre promove o sinergismo nutricional, potencializando o crescimento, a produtividade e a qualidade dos

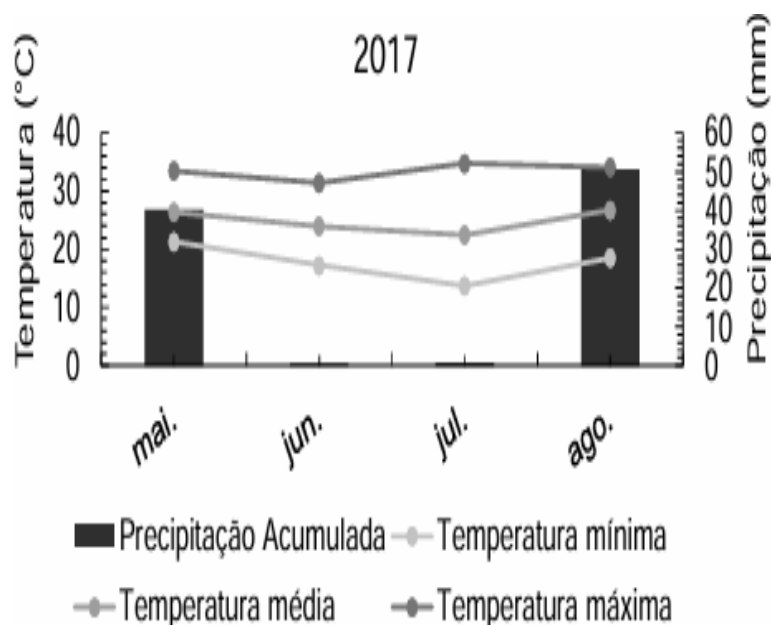
grãos da cultivar BRS 394. Portanto, objetivou-se por meio desse estudo, avaliar a interação no cultivo irrigado de trigo sob condições do Cerrado.

Metodologia

Localização experimental

O estudo foi conduzido no ano de 2017 no campo experimental da Universidade Federal de Rondonópolis, localizada no município de Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil (16°27'54.98" S, 54°34'41.75"W), a uma altitude de 284 metros. O clima da região é classificado como Aw, segundo Köppen, caracterizando-se por estações bem definidas, com verões chuvosos e invernos secos. Durante o ano de 2017, a temperatura média foi de 24,8 °C, com umidade relativa do ar de 62,47%. Os dados climáticos de precipitação acumulada e às temperaturas máxima, média e mínima observadas durante o período experimental estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Precipitação acumulada e temperaturas máxima, média e mínima do ar no período de cultivo do trigo no ano de 2017. Rondonópolis-MT.



Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).



O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico ⁽¹²⁾. As amostras foram coletadas na camada de 0,0-0,2 m, apresentando as seguintes características químicas: pH (CaCl₂ a 0,01 mol L⁻¹)= 4,6; P= 9,0 mg dm⁻³; K= 76,4 mg dm⁻³; S= 12,8 mg dm⁻³; Ca= 1,75 cmolc dm⁻³; Mg= 0,68 cmolc dm⁻³; Al+H= 5,1 cmolc dm⁻³; CTC= 7,7 cmolc dm⁻³; Matéria orgânica (M.O.)= 32,2 g kg⁻¹; Saturação por bases (V)= 33,3% e Saturação por alumínio (m)= 10%.

Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em blocos casualizados, com quatro repetições, totalizando 52 unidades experimentais. Foi utilizado um desenho experimental composto central modificado de um fatorial 5² fracionado, conforme descrito por Littell; Mott ⁽¹³⁾.

As doses de nitrogênio (N) testadas foram 0, 70, 140, 210 e 280 kg ha⁻¹, e as doses de enxofre (S) foram 0, 25, 50, 75 e 100 kg ha⁻¹. As combinações de doses N e S resultaram em 13 tratamentos: 0-0; 0-50; 0-100; 70-25; 70-75; 140-0; 140-50; 140-100; 210-25; 210-75; 280-0; 280-50; e 280-100 (kg ha⁻¹). Esse delineamento permitiu avaliar um conjunto de doses, otimizando o número de parcelas experimentais sem comprometer a qualidade dos resultados.

Cada unidade experimental foi composta por nove linhas de trigo, com 6 m de comprimento e espaçamento de 0,20 m entre linhas. A área útil foi delimitada pelas cinco linhas centrais, desconsiderando 0,75 m das extremidades, resultando em uma área útil de 4,5 m² por parcela.

Para a análise das superfícies de resposta, as doses de N e S foram transformadas em escalas codificadas (X₁ e X₂), conforme descrito por Cecon e Silva ⁽¹⁴⁾, utilizando a (Equação 1) e a (Equação 2):

Eq. 1

$$X_1 = \frac{N - \frac{(0 + 280)}{2}}{\frac{(280 - 0)}{2}} = \frac{N - 140}{140}$$



Eq. 2

$$X_2 = \frac{S - \frac{(0 + 100)}{2}}{\frac{(100 - 0)}{2}} = \frac{N - 50}{50}$$

Onde:

X_1 e X_2 são as escalas codificadas de nitrogênio e enxofre, respectivamente;

N é a dose de nitrogênio;

S é a dose de enxofre.

Os valores das doses de N e S nas escalas naturais e suas respectivas escalas codificadas foram:

Para N = 0 kg ha⁻¹ e S = 0 kg ha⁻¹: $X_1 = -1$ e $X_2 = -1$;

Para N = 70 kg ha⁻¹ e S = 25 kg ha⁻¹: $X_1 = -0,5$ e $X_2 = -0,5$;

Para N = 140 kg ha⁻¹ e S = 50 kg ha⁻¹: $X_1 = 0$ e $X_2 = 0$;

Para N = 210 kg ha⁻¹ e S = 75 kg ha⁻¹: $X_1 = 0,5$ e $X_2 = 0,5$;

Para N = 280 kg ha⁻¹ e S = 100 kg ha⁻¹: $X_1 = 1$ e $X_2 = 1$.

Esses valores codificados foram utilizados para a análise das superfícies de resposta, facilitando a interpretação dos efeitos das doses de nitrogênio e enxofre no desempenho das variáveis analisadas.

Correção da acidez do solo, adubação e semeadura

A correção da acidez do solo foi realizada com o objetivo de atingir uma saturação por bases de 60%. Para isso, aplicou-se 2.391 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico, com Poder de Neutralização Relativa Total (PRNT) de 86%. A aplicação foi feita manualmente, três meses antes da semeadura, sendo o calcário incorporado ao solo por meio de uma grade aradora, seguida de duas passagens com uma grade niveladora para uniformizar a área.

A adubação nitrogenada foi fracionada em duas etapas: 30% da dose de cada tratamento foi aplicada no momento da semeadura, enquanto os 70% restantes foram aplicados em cobertura, de forma única, no início do perfilhamento das plantas



(aproximadamente 15 dias após a emergência). A fonte de nitrogênio utilizada foi a ureia (45% N).

A adubação com enxofre foi realizada em uma única aplicação na linha de semeadura, utilizando enxofre elementar em pó (97% S). Para suprir outros nutrientes essenciais, aplicou-se:

200 kg ha⁻¹ de P₂O₅, utilizando superfosfato triplo como fonte;

180 kg ha⁻¹ de K₂O, fornecido como cloreto de potássio;

50 kg ha⁻¹ de FTE BR-12, contendo boro (1,8%), cobre (0,8%), ferro (3,8%), e molibdênio (0,1%).

A cultivar de trigo no experimento foi a BRS 394, de ciclo precoce, classificada como do tipo melhorador e recomendada para cultivos irrigados na região do Cerrado. A semeadura foi realizada em 3 de maio de 2017, utilizando uma semeadora de parcelas modelo Semina de nove linhas. O equipamento foi ajustado para distribuir as sementes a uma profundidade de 5 cm, com densidade de 350 sementes viáveis por m².

Irrigação

A irrigação foi realizada por aspersão, utilizando um sistema de barra móvel autopropelida. O manejo da água foi baseado na evapotranspiração de referência (ET₀), estimada pela equação de Penman-Monteith – FAO ⁽¹⁵⁾. Para monitorar a umidade do solo e determinar o momento adequado para irrigação, instalou-se três tubos de acesso (1 m de profundidade) em cada bloco experimental, permitindo leituras frequentes com o auxílio da sonda Diviner 2000. A irrigação era realizada quando a umidade média do solo na camada de 0-0,20 m atingia 18%, garantindo condições hídricas ideais para o desenvolvimento da cultura.

Variáveis analisadas

As variáveis analisadas foram divididas em cinco grupos principais: (1) Fitométricas: altura de plantas, número de folhas e perfilhos. (2) Nutricionais: índice de clorofila (SPAD), concentração de nitrogênio e enxofre nas folhas e grãos, teores de proteínas nas folhas e grãos, e relação N:S nas folhas e grãos. (3) Componentes de produtividade: produtividade de grãos, massa de mil grãos, massa de grãos por espiga e por espiguetas, número de espigas, número de espiguetas por espiga, número de grãos por espiga e por espiguetas. (4) Biomassa: massa seca total da parte aérea, massa seca de colmos, massa seca de espigas, índice de



colheita e eficiência no uso da água. (5) Qualidade tecnológica do trigo: peso hectolitro (PH) e número de quedas.

Fitométricas

A altura das plantas foi medida em três períodos distintos: aos 15, 30 e 45 dias após a emergência (DAE). No período vegetativo (15 e 30 dias), a altura foi determinada da superfície do solo até a ponta da última folha expandida. No período reprodutivo (45 dias), a medição foi realizada até a extremidade da espiga mais alta, excluindo as aristas. Cinco plantas da área útil de cada parcela foram avaliadas. O número de folhas e perfilhos, foi obtido por contagem direta em três pontos amostrais demarcados na área útil de cada parcela. As contagens foram realizadas aos 15, 30 e 45 DAE, sendo os resultados expressos em número de folhas e perfilhos por metro.

Nutricionais

O índice de clorofila (SPAD) foi medido com um clorofilômetro portátil no terço médio das folhas +1 e +2 de 10 plantas aleatórias na área útil de cada parcela. A concentração de nitrogênio total foi determinada a partir de 20 folhas coletadas no início do florescimento (metade folhas +1 e metade folhas +2). Após a colheita, foram coletadas amostras de grãos (50 g por tratamento). Tanto folhas quanto grãos foram secos a 65°C, triturados em moinho tipo Willey e submetidos ao método de Kjeldahl (digestão sulfúrica, destilação a vapor e titulação).

A concentração de enxofre foi obtida das mesmas amostras de folhas e grãos previamente secas e trituradas, utilizando digestão nitroperclórica, com quantificação por turbidimetria. A relação N:S foi calculada pela razão entre as concentrações de nitrogênio total e enxofre nas folhas e nos grãos de trigo.

Componentes de produtividade

A produtividade de grãos foi determinada pela colheita manual das cinco linhas centrais de cada parcela, desconsiderando as extremidades. Após a debulha das espigas, os grãos foram pesados e a umidade ajustada para 13% (base úmida), com os valores expressos em kg ha⁻¹. A massa de mil grãos foi obtida pela pesagem de 100 grãos em oito repetições. O número de espigas foi obtido a partir de amostras de três linhas de 0,5 m na área útil de



cada parcela, transformando os resultados 1 m². O número de espiguetas por espiga e de grãos por espiga foi determinado por amostras de 20 espigas, com contagem direta dos grãos. A massa de grãos por espiga foi obtida pela pesagem dos grãos das 20 espigas, corrigida para 13% de umidade. A massa de grãos por espiguetas foi calculada dividindo-se a massa de grãos por espiga pelo número de espiguetas.

Biomassa

A massa seca de espigas e colmos foi determinada a partir da coleta de três amostras de 0,5 m de linha de trigo. Espigas e colmos (colmos + folhas) foram separados, secos a 65°C até atingirem massa constante e os valores expressos em kg ha⁻¹. A massa seca total da parte aérea foi calculada pela soma da massa das espigas e dos colmos.

O índice de colheita foi calculado pela razão entre a massa seca da parte aérea total e a massa seca de grãos. A eficiência do uso da água foi avaliada de duas formas:

Pela parte aérea total, considerando a razão entre a massa seca da parte aérea e o volume de água aplicado (irrigação e precipitação), expressa em kg de massa seca por mm de água;

Pela produção de grãos, considerando a razão entre a massa de grãos e o volume de água aplicado.

Qualidade tecnológica

O peso hectolitro (PH), foi determinado pela massa de grãos em um volume de 100 L, utilizando uma balança específica para volumes de ¼ de litro, com os valores corrigidos para 13% de umidade (base úmida). O número de quedas foi utilizado para avaliar a atividade da enzima alfa-amilase, que influencia a qualidade da farinha. Para essa análise, 50 g de grãos foram moídos e peneirados em malha de 30 mesh, obtendo-se farinha integral. A farinha foi ajustada para 14% de umidade (método de estufa a 130°C por uma hora). Uma amostra de 7 g da farinha corrigida foi misturada com 25 ml de água destilada, homogeneizada por 10 segundos e analisada em um equipamento específico, que forneceu os resultados da atividade da enzima alfa-amilase em segundos (s).



Análise estática

O modelo de superfície de resposta e os termos (linear, quadrático e interação) foram avaliados por meio da análise de variância (ANOVA) e da verificação da falta de ajuste (*Lack of fit*), utilizando o teste F ($p < 0,05$). Os termos lineares, quando presentes juntamente com os termos quadráticos, foram mantidos no modelo, mesmo quando não apresentassem significância, conforme metodologia de Box; Draper ⁽¹⁶⁾; Cirillo ⁽¹⁷⁾.

Nos casos em que os critérios de seleção do modelo de superfície de resposta não foram atendidos, foram estudados analisados os efeitos isolados e interação dos fatores, utilizando a análise de regressão polinomial. Para a significância dos efeitos, foram considerados o teste F ($p < 0,05$) da ANOVA e o teste t de Student ($p < 0,05$).

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R versão 3.4.2® ⁽¹⁸⁾. Para a análise do modelo de superfície de resposta, foi utilizado o pacote rsm ⁽¹⁹⁾. A ANOVA foi realizada com o software SISVAR ⁽²⁰⁾. Além disso, para garantir que os dados seguissem uma distribuição aproximadamente gaussiana, foi empregada a transformação de Box-Cox, com a utilização do pacote MASS.

Resultados e Discussões

Características fitométricas

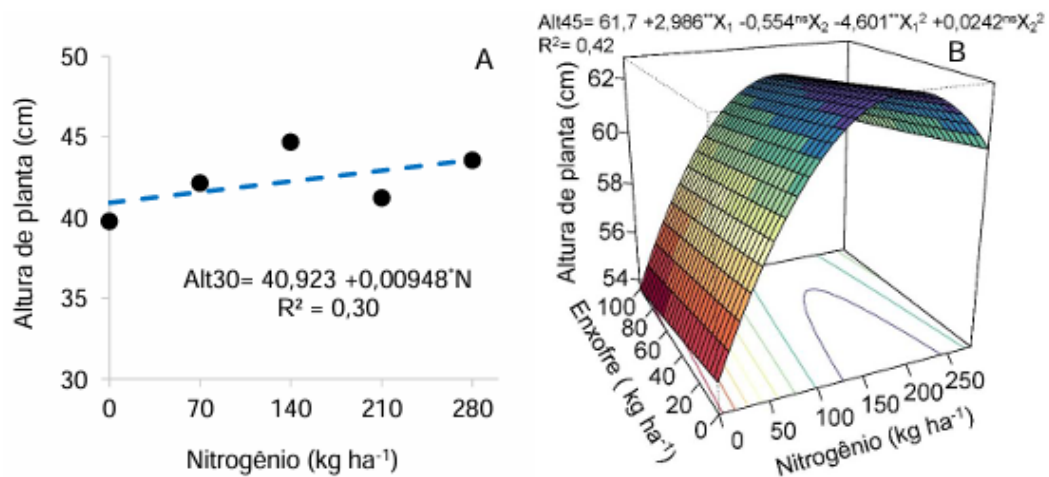
Altura de plantas

A altura das plantas de trigo aos 15 dias após a emergência não apresentou diferença significativa, com valor médio de 27,8 cm. Aos 30 dias, a altura das plantas não se ajustou ao modelo de superfície de resposta, mas observou-se uma resposta linear à adubação nitrogenada, com um aumento de 6,1% na altura das plantas para a dose de 280 kg ha⁻¹ de nitrogênio, em comparação com a ausência da aplicação (Figura 2A).

Aos 45 dias após a emergência, o modelo de regressão múltipla ajustou-se à variável altura de plantas, indicando que o modelo de superfície de resposta, com efeitos linear e quadrático. Nesse ponto, a adubação nitrogenada teve um impacto significativo, com um ponto de crista de 62,7 cm observado na dose de 185 kg ha⁻¹ de nitrogênio, sem a aplicação de enxofre (Figura 2B). A resposta da altura das plantas a esta dose de nitrogênio destaca o

papel essencial do nitrogênio no crescimento vegetal, essencialmente limitante para o desenvolvimento das plantas.

Figura 2 - Adubação nitrogenada na altura de plantas aos 30 dias após a emergência (A) e das combinações das adubações com nitrogênio e enxofre, na altura de plantas aos 45 dias após a emergência (B), da cultivar de trigo BRS 394. Rondonópolis-MT.



ns, ** e * = não significativo e significativo a 1 e 5%, respectivamente; X1 e X2 = codificações das doses de nitrogênio e enxofre, respectivamente.
Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).

O nitrogênio é o principal nutriente que impulsiona o crescimento das plantas, pois é o componente central da clorofila, influenciando diretamente o potencial fotossintético e formação de ácidos nucléicos⁽⁵⁾. O efeito positivo da adubação nitrogenada, com aumento na altura das plantas, reforça a importância do manejo adequado de nitrogênio para a otimização do crescimento do trigo.

Diversos estudos relatam aumentos na altura das plantas de trigo com a aplicação de doses de nitrogênio, como observados por Melero et al.⁽²¹⁾ e Li et al.⁽²²⁾. No entanto, o estudo presente se destaca por mostrar a interação mais eficaz entre doses de nitrogênio e a resposta da planta, considerando variáveis críticas como o uso de enxofre e o comportamento específico das doses de nitrogênio em relação ao crescimento do trigo em condições locais. A dose de 185 kg ha⁻¹ de nitrogênio, associada à ausência de enxofre, se mostrou eficiente,



contrastando com outras pesquisas que observaram menores incrementos ou diferentes padrões de resposta.

Em relação ao enxofre, o efeito observado foi uma redução de 1,11 cm na altura das plantas. Embora outros estudos, como o de Ghafoor et al. ⁽⁷⁾, relatem aumentos significativos na altura das plantas com a adubação de enxofre, o efeito negativo observado neste estudo pode ser atribuído a uma possível acidificação do solo devido ao uso de enxofre elementar. Isso sugere que a aplicação do enxofre no trigo deve ser realizada com cautela, para evitar interferências no pH do solo que possam prejudicar o crescimento da planta, um ponto crítico que distingue este estudo de outros que não observaram esse efeito adverso.

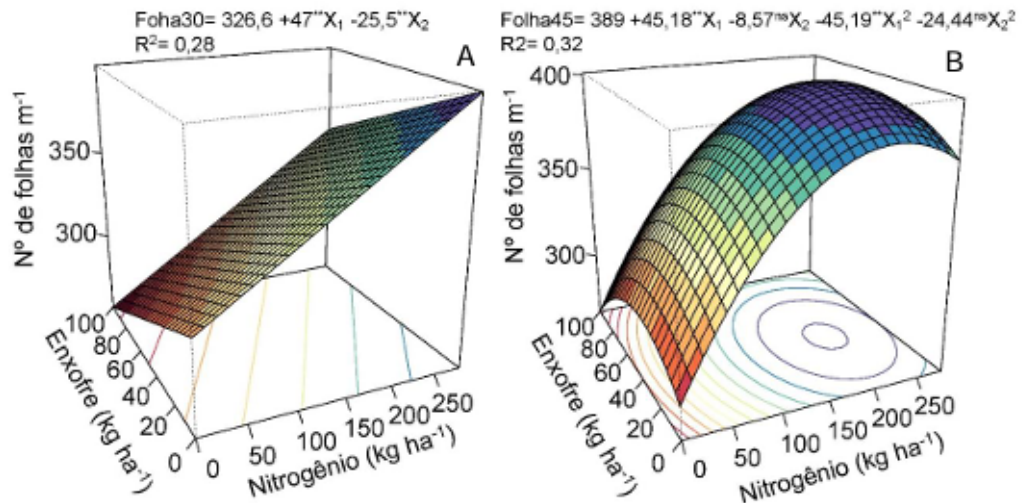
Número de folhas

O número de folhas aos 15 DAE não apresentou diferença significativa entre os tratamentos avaliados. No entanto, aos 30 DAE, o número de folhas diferiu estatisticamente, com o modelo de regressão múltipla ajustando-se aos dados e indicando que o modelo de superfície de resposta com efeitos lineares pode ser utilizado para explicar a variável número de folhas nessa fase.

Aos 30 DAE, observou-se incremento de 27% no número de folhas quando a dose de nitrogênio foi aumentada para 280 kg ha⁻¹, com a dose de enxofre de 100 kg ha⁻¹, em comparação com a ausência de nitrogênio (Figura 3A). Em contrapartida, o aumento da dose de enxofre para 100 kg ha⁻¹ resultou em uma redução de 13% no número de folhas em relação à ausência de aplicação do nutriente.

Aos 45 DAE, o número de folhas ajustou-se ao modelo de superfície de resposta com efeitos lineares e quadráticos, atingindo uma produção máxima de 395 folhas m⁻¹ nas combinações de 210 kg ha⁻¹ de nitrogênio com 41 kg ha⁻¹ de enxofre (Figura 3B). Nesse ponto, a relação entre os nutrientes na adubação foi de 5,12 (N:S).

Figura 3 - Combinações das adubações com nitrogênio e enxofre, no número de folhas aos 30 (A) e 45 (B) dias após a emergência das plantas, da cultivar de trigo BRS 394. Rondonópolis-MT.



ns e **= não significativo e significativo a 1%, respectivamente; X1 e X2= codificações das doses de nitrogênio e enxofre, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).

Os resultados demonstraram o papel do nitrogênio no aumento do número de folhas, evidenciando a importância no desenvolvimento vegetativo das plantas e na maior eficiência fotossintética. Isso está em consonância com os achados de Pietro-Souza et al. ⁽²³⁾, que relatam um crescimento foliar mais robusto na cultura do trigo em ambiente protegido, com uma dose ideal para a produção máxima de folhas estimadas em 195,6 mg dm⁻³. No entanto, este estudo avançou para identificar que o efeito do nitrogênio pode ser otimizado quando combinado com o enxofre, atingindo a produção máxima de folhas em doses específicas de ambos os nutrientes.

Embora o enxofre tenha reduzido o número de folhas em doses mais elevadas, seu papel no metabolismo das plantas não pode ser subestimado. O enxofre contribui para a eficiência do nitrogênio, promovendo maior divisão celular e síntese de proteínas, o que resulta em maior desenvolvimento vegetativo. Essa interação entre os nutrientes foi observada de maneira semelhante em estudos anteriores, como de Batista e Monteiro ⁽²⁴⁾, que destacam o efeito positivo da combinação de nitrogênio e enxofre no aumento da



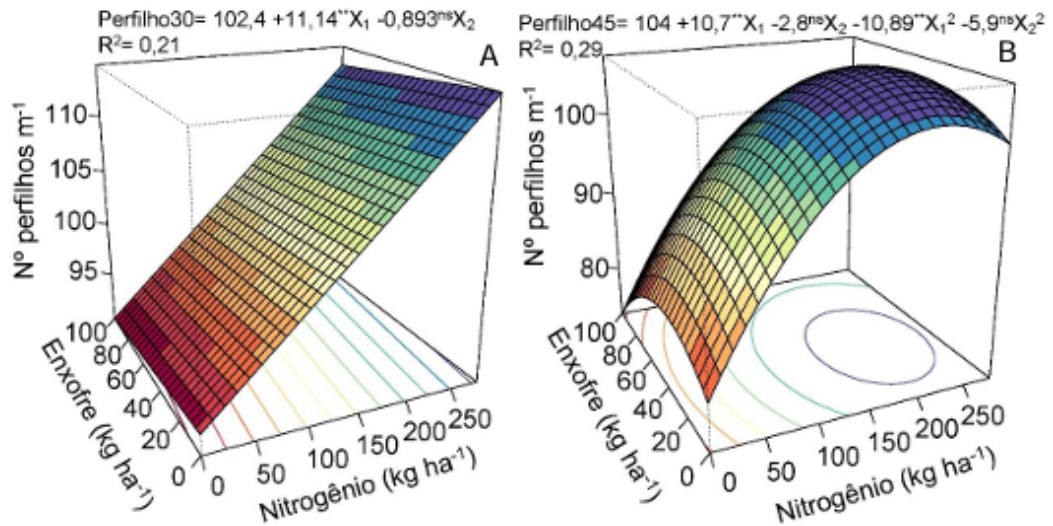
produção de folhas capim-marandu (*Urochloa brizantha* cv. Marandu). A interação entre os dois nutrientes neste estudo complementa esses achados, confirmando a relevância dessa combinação para o desenvolvimento das plantas.

É importante ressaltar que o excesso de nitrogênio pode levar a um crescimento excessivo das folhas, o que pode resultar em autossombreamento e, conseqüentemente, redução da taxa fotossintética. He et al. ⁽²⁵⁾ enfatizam que, embora o nitrogênio seja fundamental para o desenvolvimento da parte aérea das plantas, é necessário equilibrar suas doses para evitar efeitos adversos no crescimento. No contexto deste estudo, o modelo de superfície de resposta permitiu identificar a dose ideal para maximizar o número de folhas sem comprometer a fotossíntese, indicando um manejo mais eficiente dos nutrientes.

Número de perfilhos

O número de perfilhos aos 15 DAE não apresentou diferença estatística em relação as aplicações de nitrogênio e enxofre, com média de 77 perfilhos m⁻¹. Aos 30 DAE, o modelo de superfície de resposta com efeito linear foi adequado para explicar a variável, evidenciando o aumento expressivo da adubação nitrogenada. Observou-se incremento de 20% no número de perfilhos na dose de 280 kg ha⁻¹ de nitrogênio em comparação à ausência de aplicação do nutriente (Figura 4A). O uso de enxofre apresentou influência restrita, resultando em uma leve diminuição no perfilhamento.

Figura 4- Combinações das adubações com nitrogênio e enxofre, no número de perfilhos aos 30 (A) e 45 (B) dias após a emergência das plantas, da cultivar de trigo BRS 394. Rondonópolis-MT.



ns e **= não significativo e significativo a 1%, respectivamente; X1 e X2= codificações das doses de nitrogênio e enxofre, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).

Aos 45 DAE, o modelo de regressão múltipla, considerando efeitos linear e quadrático, foi significativo para explicar o número de perfilhos. A máxima produção de 107 perfilhos m^{-1} , foi obtida na combinação de 209 $kg\ ha^{-1}$ de nitrogênio e 38 $kg\ ha^{-1}$ de enxofre representando uma relação N:S de 5,5:1 (Figura 4B). Este resultado evidencia que a interação entre os nutrientes é importante para otimizar o perfilhamento na cultura do trigo, sendo que a proporção adequada potencializa o desenvolvimento vegetativo e a formação de estruturas reprodutivas.

O número de perfilhos é um parâmetro determinante para a produtividade, pois influencia diretamente o número de espigas, que por sua vez, define o rendimento de grãos. Neste estudo, importante, pois pode proporcionar maior número de espigas ⁽²⁶⁾. Neste estudo, o manejo nitrogenado, especialmente na dose de 209 $kg\ ha^{-1}$ em combinação com enxofre, proporcionou resultados superiores em relação às práticas descritas na literatura. Por exemplo, enquanto Nunes et al. ⁽²⁷⁾ observaram aumentos no perfilhamento com 110 $kg\ ha^{-1}$ de nitrogênio, o presente trabalho demonstra que doses mais elevadas, em equilíbrio com



enxofre, podem maximizar o número de perfilhos sob condições de cultivo no Cerrado brasileiro.

Adicionalmente, enquanto pesquisas em outras regiões, como os Pampas Argentinos, também reportaram incrementos no perfilhamento com combinações de nitrogênio e enxofre ⁽²⁸⁾, este estudo demonstra que o comportamento das plantas é altamente dependente das condições edafoclimáticas e do manejo local. A resposta observada em Rondonópolis-MT, com maior perfilhamento na relação N:S de 5,5:1, ressalta a necessidade de ajustar as doses para maximizar os benefícios sob condições específicas de solo e clima.

Embora Ali et al. ⁽²⁹⁾ tenham identificado aumentos no número de perfilhos com 50 kg ha⁻¹ de enxofre, os resultados aqui apresentados indicam que doses mais equilibradas, combinadas com maiores níveis de nitrogênio, proporcionam maior eficiência no desenvolvimento das plantas.

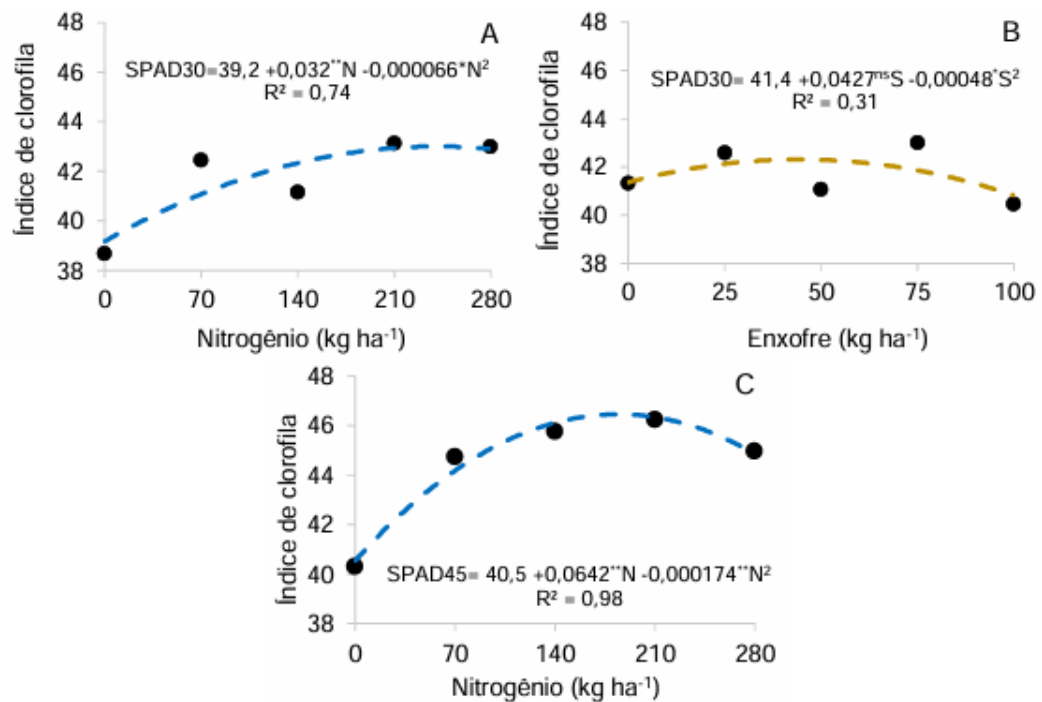
Características nutricionais

Índice de clorofila, nitrogênio, enxofre, proteína e nitrogênio: enxofre nas folhas

O índice de clorofila das folhas de trigo, avaliado aos 30 e 45 DAE, não se ajustou ao modelo de superfície de resposta. No entanto, houve significância isolada para doses de nitrogênio e enxofre aos 30 DAE, enquanto aos 45 DAE, apenas o nitrogênio apresentou significância, ajustando-se ao modelo quadrático de regressão.

A concentração de enxofre nas folhas não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, com valor médio de enxofre de 4,1 g kg⁻¹. Aos 30 DAE, o índice de clorofila das folhas aumentou com a adubação nitrogenada, alcançando máximo de 43,1 SPAD na dose de 242 kg ha⁻¹ de nitrogênio (Figura 5A). Já em relação à adubação sulfurada, o índice máximo de 42,3 SPAD foi obtido com a dose de 44,5 kg ha⁻¹ de enxofre (Figura 5B).

Figura 5 - Adubação nitrogenada no índice de clorofila aos 30 (A) e 45 dias (C) e adubação sulfurada no índice de clorofila aos 30 (B) dias após a emergência, da cultivar de trigo BRS 394, em Rondonópolis-MT.



ns, ** e * = não significativo e significativo a 1 e 5%, respectivamente.
Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).

Aos 45 DAE, o índice de clorofila das folhas também aumentou com a adubação nitrogenada, atingindo um máximo de 46,5 SPAD na dose de 184 kg ha⁻¹ de nitrogênio (Figura 5C). Esse aumento pode ser atribuído à maior da formação de cloroplastos, dependentes de enzimas constituídas por nitrogênio. Assim, a maior concentração de nitrogênio total nas folhas, proporcionada pela adubação nitrogenada, resultou no incremento do índice de clorofila.

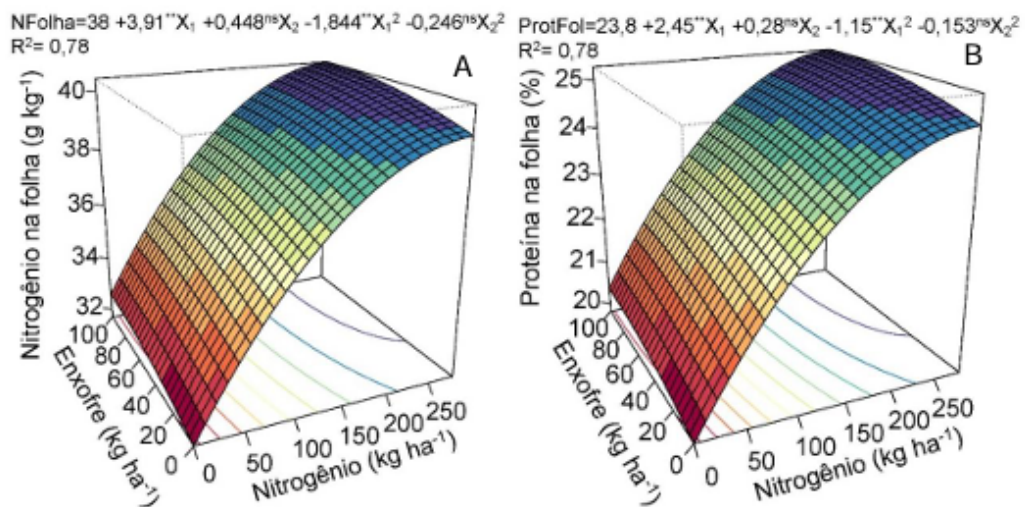
Teixeira Filho et al. ⁽³⁰⁾, relataram aumento quadrático no índice de clorofila em trigo cultivado no Cerrado, alcançando 46 SPAD com dose de 147 kg ha⁻¹ de nitrogênio. Mohamed et al. ⁽³¹⁾ e Zhang et al. ⁽³²⁾, também observaram efeitos positivos da adubação nitrogenada no índice de clorofila em diferentes condições experimentais. Além disso, o aumento no índice de clorofila pela adubação sulfurada é reforçado pelo estudo Li et al. ⁽²²⁾, que observaram

aumentos na clorofila de duas cultivares de trigo sob diferentes doses de enxofre. Esses estudos validam a relevância dos efeitos observados em nosso experimento, demonstrando a consistência dos resultados obtidos.

O modelo de regressão múltipla apresentou significância para as variáveis concentração de nitrogênio e proteína nas folhas aos 45 DAE, indicando que o modelo de superfície de resposta com efeitos linear e quadrático, pode ser adotado para explicar as variáveis.

As adubações influenciaram significativamente as concentrações de nitrogênio total e proteína nas folhas de trigo aos 45 DAE, sendo a melhor combinação obtida com 280 kg ha⁻¹ de nitrogênio e 100 kg ha⁻¹ de enxofre. Essa combinação resultou em um ponto de crista de 40,3 g kg⁻¹ de nitrogênio total e proteína bruta de 25,2% de proteína bruta (Figuras 6A e 6B), correspondendo a uma relação N:S de 2,8:1.

Figura 6 - Combinações das adubações com nitrogênio e enxofre, na concentração de nitrogênio total (A) e proteína bruta (B) nas folhas aos 45 dias após a emergência, da cultivar de trigo BRS 394. Rondonópolis-MT.



ns e **= não significativo e significativo a 1%, respectivamente; X1 e X2= codificações das doses de nitrogênio e enxofre, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).



A adubação nitrogenada aumentou a disponibilidade de nitrogênio no solo, proporcionando maior absorção do nutriente e incrementando a concentração de nitrogênio total nas folhas de trigo. Esse aumento é essencial para a formação de proteínas, o que também se refletiu no aumento do teor de proteína nas folhas. Saad et al. ⁽³³⁾ explicam que esse comportamento ocorre porque o teor de proteína é diretamente determinado pela concentração de nitrogênio, o que valida os resultados obtidos.

Vettorazzi et al. ⁽³⁴⁾, ao investigar dose e épocas de aplicação de nitrogênio no milho, também observaram incremento linear na concentração de nitrogênio foliar em resposta à adubação nitrogenada, corroborando os padrões verificados neste estudo com trigo. Além disso, Malavolta et al. ⁽³⁵⁾ indicam que as concentrações de nitrogênio consideradas ideais para folhas diagnosticas de trigo variam entre 30 a 33 g kg⁻¹, confirmando que as maiores doses de nitrogênio testadas neste experimento levaram a concentrações acima desses valores, evidenciando a eficiência da adubação nitrogenada em melhorar a nutrição de plantas.

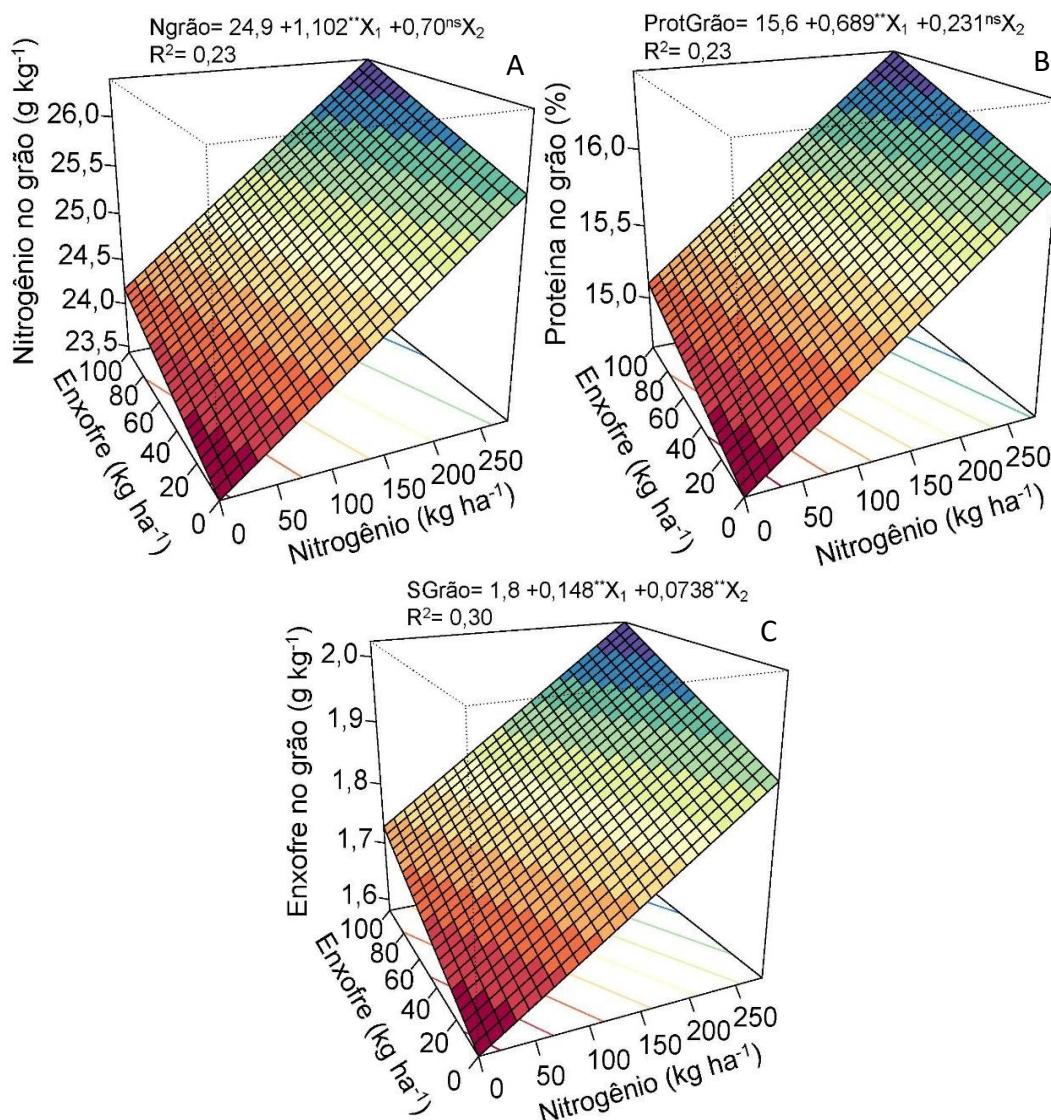
No caso da concentração de enxofre nas folhas aos 45 DAE, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, mas com valor médio 4,1 g kg⁻¹. Segundo Malavolta et al. ⁽³⁵⁾, esse valor está dentro da faixa considerada adequada para o trigo, 4 g kg⁻¹.

Nitrogênio, enxofre, proteína e enxofre nos grãos

As concentrações de nitrogênio total, enxofre e proteína nos grãos de trigo foram sensíveis às doses de nitrogênio e enxofre aplicadas, validando o uso do modelo de superfície de resposta com efeitos lineares para descrever essas variáveis. Os maiores valores dessas concentrações foram obtidos com doses de 280 kg ha⁻¹ de nitrogênio e 100 kg ha⁻¹ de enxofre, com efeitos mais acentuados para o nitrogênio e moderados para o enxofre (Figuras 7A, 7B e 7C). Cada 10 kg de nitrogênio aplicado por hectare resultou em aumento de 0,08 g kg⁻¹ na concentração de nitrogênio, 0,01 g kg⁻¹ de enxofre e 0,05% na concentração de proteína. Para o enxofre, cada 10 kg aplicados por hectare elevaram a concentração de enxofre nos grãos em 0,015 g kg⁻¹ aos 45 DAE.

Figura 7 - Combinações das adubações com nitrogênio e enxofre na concentração de nitrogênio total (A), proteína (B) e enxofre (C) nos grãos, da cultivar de trigo BRS 394.

Rondonópolis-MT.



ns e **= não significativo e significativo a 1%, respectivamente; X1 e X2= codificações das doses de nitrogênio e enxofre, respectivamente.
 Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).

Parte do nitrogênio presente nos grãos de trigo provém da absorção durante o enchimento dos grãos. Contudo, como a disponibilidade de nitrogênio no solo diminui ao longo do tempo após a adubação, as plantas recorrem à redistribuição de nutrientes das folhas para os grãos. Como o nitrogênio é um nutriente móvel, ele é retranslocado, contribuindo para o



aumento da concentração de nitrogênio total nos grãos, o que também resulta no aumento da concentração de proteína bruta.

Estudos realizados por Wrobel et al. ⁽³⁶⁾ com doses de nitrogênio (120 e 180 kg ha⁻¹) em trigo de duplo propósito demonstraram aumento nas concentrações de proteína bruta nos grãos e palhada do trigo, atingindo um valor máximo de 13,28%, inferior ao observado no presente estudo. Da mesma forma, Boschini et al. ⁽³⁷⁾, ao testarem diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio no Cerrado, identificaram interação entre esses fatores, com maior concentração de proteína bruta (17,6%) ocorrendo na combinação de 264 mm de irrigação e 200 kg ha⁻¹ de nitrogênio.

Os valores de nitrogênio nos grãos obtidos neste estudo foram superiores à média de 20 kg ha⁻¹ apresentada por Cantarella ⁽³⁸⁾, indicando que a cultivar utilizada, aliado ao aumento na disponibilidade de nitrogênio, contribuiu para esses resultados.

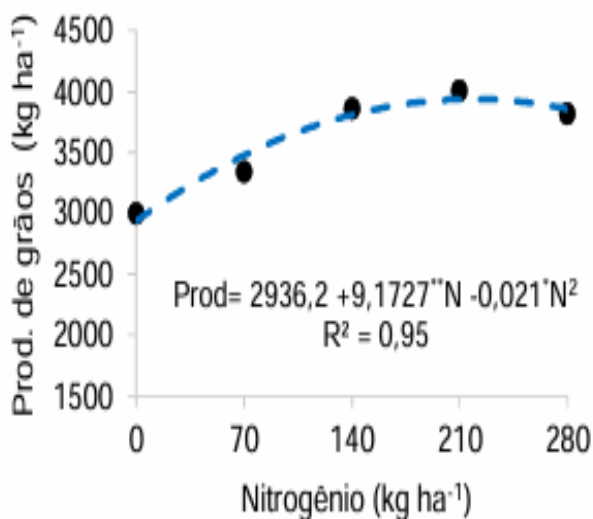
O aumento nas concentrações de enxofre nos grãos foi atribuído à maior disponibilidade de enxofre no solo pela adubação sulfurada. Randall et al. ⁽³⁹⁾, ao estudarem a adubação de nitrogênio e enxofre no trigo na Austrália, também observaram aumentos nas concentrações de enxofre nos grãos em função das doses aplicadas. Zhao et al. ⁽⁴⁰⁾ descreve que o aumento da concentração de enxofre nos grãos melhora a qualidade de panificação, promovendo maior volume do pão produzido com a farinha de trigo.

Componentes de produtividade de grãos

Produtividade de grãos

A produtividade de grãos de trigo não apresentou ajuste ao modelo de superfície de resposta, mas foi significativa de forma isolada para nitrogênio, com ajuste ao modelo quadrático de regressão. A máxima produtividade de grãos de trigo foi alcançada com dose de 218 kg ha⁻¹ de nitrogênio, resultando em 3.938 kg ha⁻¹ (Figura 8).

Figura 8 – Efeito da adubação nitrogenada na produtividade de grãos da cultivar de trigo BRS 394. Rondonópolis-MT.



**= significativo a 1%.

Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).

O aumento na produtividade de grãos de trigo com adubação nitrogenada pode ser explicado pelo fato de que o nitrogênio favoreceu o aumento do número de grãos por espiga e espiguetas, além de aumentar a massa de grãos por espiga. Isso é consistente com os achados de Alves et al. ⁽⁴¹⁾, que observaram que a adubação nitrogenada aumentou a produtividade de grãos e número de espigas em cultivares de trigo. Eles constataram que a maior dose aplicada em cobertura (120 kg ha⁻¹) foi a que proporcionou a maior produtividade (2.685 kg ha⁻¹), quando todos os tratamentos receberam 20 kg ha⁻¹ de nitrogênio na semeadura.

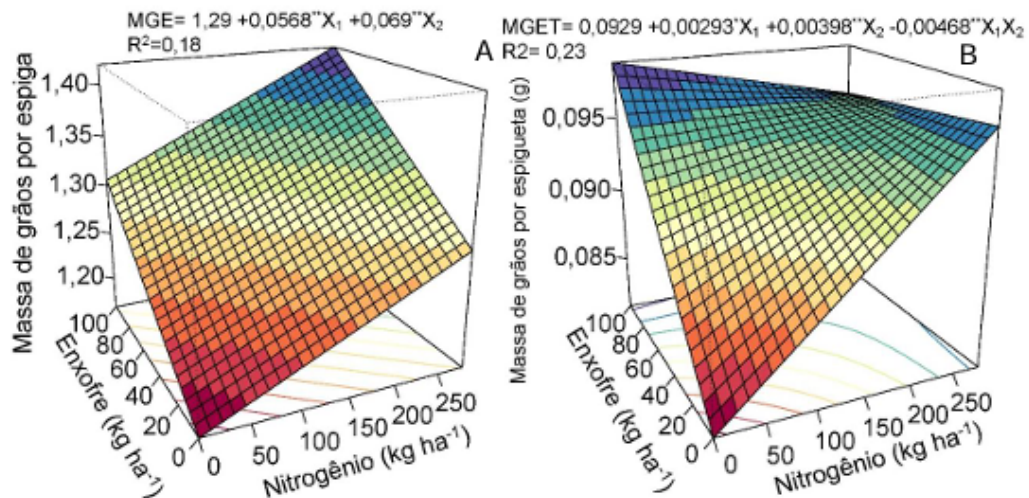
Além disso, estudos de Elli et al. ⁽⁴²⁾ indicam que a interação entre redutores de crescimento e doses de nitrogênio tem efeito positivo sobre a produtividade. A produtividade máxima observada por eles foi de 4.235 kg ha⁻¹ com o uso do redutor de crescimento e a dose de 138 kg ha⁻¹ de nitrogênio. Quando não se utilizou o redutor, a maior produtividade foi de 3.787 kg ha⁻¹, com a dose de 109 kg ha⁻¹ de nitrogênio. Outros estudos também corroboram esses resultados, como os Bonfim-Silva et al. ⁽⁴³⁾, Zhang et al. ⁽³²⁾ e Saad et al. ⁽³³⁾ que observaram incrementos na produtividade de grãos de trigo com o aumento das doses de nitrogênio.

Massa de mil grãos, massa de grãos por espiga e massa de grãos por espiguetas

A massa de mil grãos não apresentou diferença estatística, com valor médio de 1,29 g espiga⁻¹. No entanto, a massa de grãos por espiga, apresentou diferença estatística para regressão múltipla, indicando que o modelo de superfície de resposta com efeitos lineares pode ser utilizado para explicar esta variável.

Na massa de grãos por espiguetas, observou-se efeito de interação entre nitrogênio e enxofre, demonstrando que o modelo de superfície de resposta com efeitos linear e interação pode ser adotado para explicar essa variável. A massa de grãos por espiga também foi influenciada pelos tratamentos, sendo que o maior valor (1,42 g espiga⁻¹) foi observado com a dose de 280 kg ha⁻¹ de nitrogênio combinada com a dose de 100 kg ha⁻¹ de enxofre (Figura 9A).

Figura 9 - Combinações das adubações com nitrogênio e enxofre, na massa de grãos por espiga (A) e massa de grãos por espiguetas (B), da cultivar de trigo BRS 394. Rondonópolis-MT.



** e * = significativo a 1 e 5%, respectivamente; X1 e X2 = codificações das doses de nitrogênio e enxofre, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).

No caso da massa de grãos por espiguetas (Figura 9B), a maior massa (0,099 g espiguetas⁻¹) foi observada com a dose de enxofre de 100 kg ha⁻¹, na ausência da adubação com nitrogênio. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que o aumento da massa de

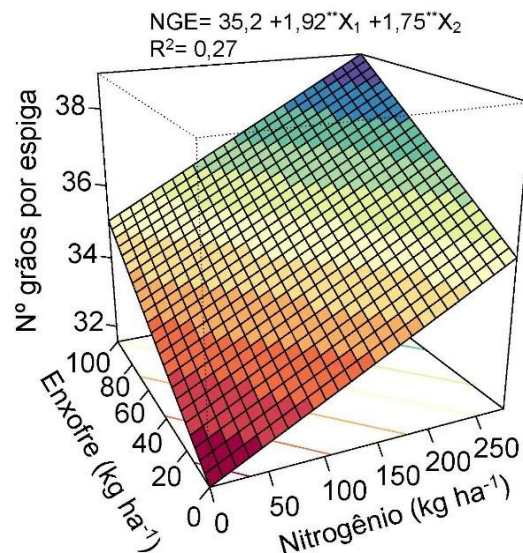
grãos por espiga e espiguetas foi impulsionado pelo aumento do número de grãos, o que por sua vez, proporcionou maior massa nessas partes da planta. Essa ocorrência também foi notada por El-Sobky⁽⁴⁴⁾, que, em seus estudos com adubação nitrogenada em trigo no Egito, constatou que a massa de grãos por espiga aumentou devido ao incremento no número de grãos.

Número de espigas, espiguetas por espiga, grãos por espiga e grãos por espiguetas

O número de espigas, espiguetas por espiga e grãos por espiguetas apresentaram diferença estatística, com valores médios de 352 espigas m⁻², 13,9 espiguetas espiga⁻¹ e 27,3 grãos espiguetas⁻¹, respectivamente.

Por outro lado, o modelo de regressão múltipla foi significativo para número de grãos por espiga, indicando que o modelo de superfície de resposta com efeitos lineares pode ser utilizado para explicar esta variável. O número de grãos por espiga foi influenciado pelos tratamentos, sendo o maior valor (38,9 grãos espiga⁻¹) observado com a dose de 280 kg ha⁻¹ de nitrogênio combinada com 100 kg ha⁻¹ de enxofre (Figura 10).

Figura 10 – Efeito das combinações de adubações com nitrogênio e enxofre no número de espigas da cultivar de trigo BRS 394. Rondonópolis-MT.



**= significativo a 1%; X₁ e X₂= codificações das doses de nitrogênio e enxofre, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).



O aumento no número de grãos por espiga pode ser atribuído ao efeito do nitrogênio, que provavelmente promoveu um maior número de flores por espiga e espigueta. Estudos prévios sugerem que o nitrogênio pode estimular o florescimento das plantas, aumentando a divisão celular e, conseqüentemente, o número de flores. Abdenaceur et al. ⁽⁴⁵⁾ apontam que o nitrogênio favorece o florescimento ao promover a divisão celular. Além disso, Belkebla et al. ⁽⁴⁶⁾ afirmam que o nitrogênio em altas concentrações pode elevar a concentração de ácido giberélico, o que, por sua vez, pode levar ao aumento do número de flores.

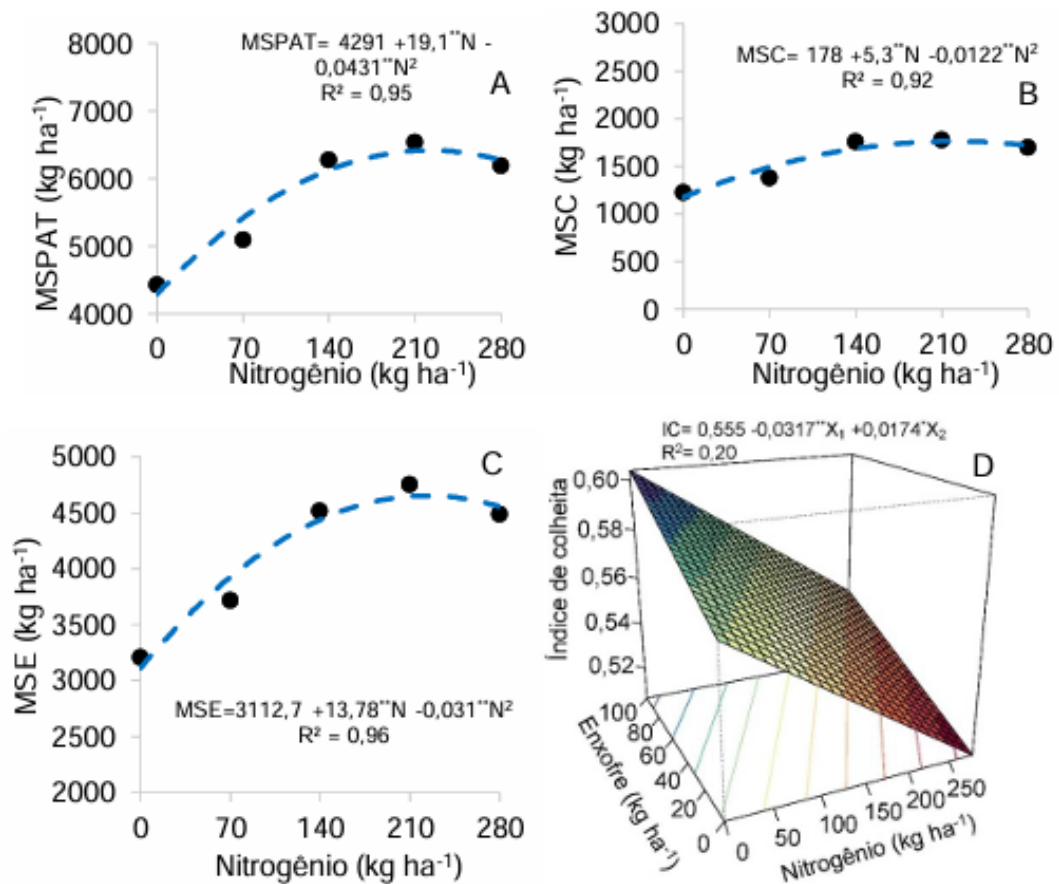
Resultados semelhantes foram observados por Melero et al. ⁽²¹⁾, que, em dois anos de estudos sobre adubação nitrogenada em trigo, relataram aumentos no número de grãos por espiga. No primeiro ano, o ajuste foi linear, com um incremento de 11,4% ao comparar a maior dose (125 kg ha⁻¹) com a ausência de aplicação de nitrogênio. No segundo ano, o incremento foi de 17,8%, com um ajuste de regressão quadrática, obtendo a produção máxima (41,9 grãos espiga⁻¹) na dose de 103,3 kg ha⁻¹ de nitrogênio.

Biomassa

Massa seca da parte aérea total, colmos, espigas e índice de colheita

As massas secas da parte aérea total, colmo e espigas de trigo não apresentaram ajustes ao modelo de superfície de resposta. No entanto, essas variáveis apresentaram diferença estatística isolada para nitrogênio, com ajustes ao modelo quadrático de regressão. As maiores produtividades de biomassa seca da parte aérea total, colmo e espigas de trigo foram observadas nas doses de nitrogênio de 222, 219 e 224 kg ha⁻¹, promovendo produtividades de 6.414, 1.765 e 3.113 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 11A, 11B e 11C).

Figura 11 - Influência da adubação nitrogenada nas massas secas da parte aérea total (A), colmos (B) e espigas (C) e das combinações das adubações com nitrogênio e enxofre, no índice de colheita (D) da cultivar de trigo BRS 394. Rondonópolis-MT.



ns, **= não significativo e significativo a 1%; X1 e X2= codificações das doses de nitrogênio e enxofre, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).

A adubação nitrogenada favoreceu o incremento da produção de biomassa seca do trigo, principalmente devido ao maior crescimento e desenvolvimento vegetativo das plantas, resultante no aumento da produção de fotoassimilados. Esse resultado é corroborado por El-Sobky ⁽⁴⁴⁾, que, ao estudar os efeitos de doses de nitrogênio (30, 60 e 90 kg ha⁻¹), manejo da palhada de arroz do cultivo antecedente (queimada ou incorporada) e doses de fósforo (0 e 15,5 kg ha⁻¹ P₂O₅) no trigo no Egito, observou aumento da produção de biomassa com a adubação nitrogenada até a dose de 60 kg ha⁻¹, sem diferença significativa em relação à dose



de 90 kg ha⁻¹. Além disso, a aplicação de fósforo e a queima da palhada de arroz reduziram a biomassa do trigo.

Pietro-Souza et al. ⁽²³⁾ também observaram ajustes ao modelo quadrático de regressão no desenvolvimento do trigo comum submetido a doses de nitrogênio (0 a 400 mg dm⁻³) em ambiente protegido, com a máxima produção de massa seca da parte aérea total (10,4 g vaso⁻¹) ocorrendo na dose de 165 mg dm⁻³ de nitrogênio. Além disso, outras pesquisas com adubação nitrogenada no trigo, como as de Zhang et al. ⁽⁴⁷⁾, relataram aumento na produção de biomassa com o uso de nitrogênio.

O índice de colheita, ajustou-se ao modelo de regressão múltipla, demonstrando que o modelo de superfície de resposta com efeitos linear, pode ser empregada para explicar a variável índice de colheita.

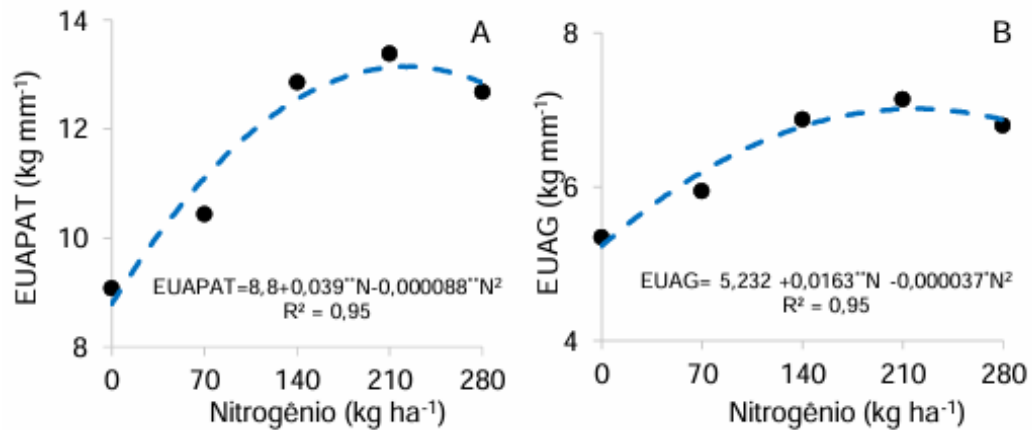
O índice de colheita ajustou-se ao modelo de regressão múltipla, demonstrando que o modelo de superfície de resposta com efeitos lineares pode ser utilizado para explicar essa variável. O maior índice de colheita (0,6) foi observado quando as plantas foram submetidas à combinação de 100 kg ha⁻¹ de enxofre e à ausência de adubação com nitrogênio (Figura 11D). A cada 10 kg de enxofre aplicados por hectare, observou-se um aumento de 0,003 unidades no índice de colheita. Em contraste, o aumento na adubação com nitrogênio levou a uma redução do índice de colheita, sendo que a cada 10 kg de nitrogênio aplicados por hectare, houve uma redução de 0,001 unidades.

A diminuição no índice de colheita com o aumento da adubação nitrogenada corrobora os achados de Zagonel e Fernandes ⁽⁴⁸⁾, que, ao estudarem diferentes cultivares de trigo submetidos a doses de nitrogênio (50 e 240 kg ha⁻¹) e reguladores de crescimento, relataram uma redução no índice de colheita com o aumento das doses de nitrogênio.

Eficiência do uso da água

As eficiências do uso da água na produção da parte aérea total e produção de grãos de trigo não apresentam ajustes ao modelo de superfície de resposta. Entretanto, foram significativas apenas para doses de nitrogênio, com ajustes ao modelo quadrático de regressão. As máximas eficiências do uso da água para a produção da parte aérea total e de grãos de trigo foram observadas nas doses de nitrogênio de 223 e 220 kg ha⁻¹, resultando em eficiências de 13,2 e 7 kg mm⁻¹, respectivamente (Figuras 12A e 12B).

Figura 12 - Influência da adubação nitrogenada nas eficiências do uso da água na parte aérea total (A) e nos grãos (B) da cultivar de trigo BRS 394. Rondonópolis-MT.



** e * = significativo a 1 e 5%, respectivamente.
 Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).

Para produzir 1 kg ha⁻¹ de massa seca da parte aérea de trigo, foi necessário um consumo de água de 757,6 L ha⁻¹ de água via irrigação, enquanto para 1 kg ha⁻¹ de massa seca de grãos, o consumo foi de 1.428,6 L ha⁻¹.

Resultados similares foram observados por Bonfim-Silva et al. ⁽⁴⁹⁾, que, ao estudarem combinações de nitrogênio e enxofre no capim-braquiária, encontraram efeito de interação entre esses nutrientes no primeiro corte, com máxima eficiência do uso da água alcançada nas combinações de 304 e 25 mg dm⁻³ de nitrogênio e enxofre, respectivamente. Nos cortes subsequentes, o efeito foi isolado para o nitrogênio, com ajuste ao modelo quadrático de regressão e maior eficiência do uso da água nas doses de 317 e 305 mg dm⁻³, alcançando valores próximos a 7.

Pesquisa realizada por Souza et al. ⁽⁵⁰⁾ com milho doce em sistema irrigado e doses de nitrogênio em cobertura na região do Cerrado também identificou incremento na eficiência do uso da água devido à adubação nitrogenada. Esses autores relataram ajuste quadrático no período inverno/primavera, com máxima eficiência na dose de 168 kg ha⁻¹ de nitrogênio, enquanto no verão/outono foi observada resposta linear ao aumento das doses de nitrogênio.

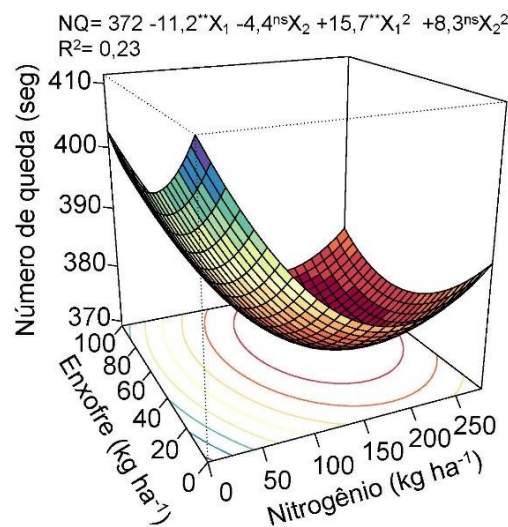
Qualidade tecnológica do trigo

Peso hectolitro e número de queda

A variável peso hectolitro não apresentou diferenças estatísticas em relação às aplicações de nitrogênio e enxofre, com valor médio observado de 81,4 kg hL⁻¹.

Quanto ao número de queda da farinha de trigo, verificou-se um efeito significativo ajustado ao modelo de superfície de resposta, com influência dos efeitos linear e quadrático, o que permite a aplicação desse modelo para explicar a variável. As adubações realizadas nas plantas de trigo influenciaram o número de queda da farinha integral, sendo que o ponto de crista (411,6 segundos) foi registrado na ausência de aplicações de nitrogênio e enxofre (Figura 13).

Figura 13 - Combinações das adubações com nitrogênio e enxofre no número de queda da farinha, da cultivar de trigo BRS 394. Rondonópolis-MT.



ns e **= não significativo e significativo a 1%, respectivamente; X1 e X2= codificações das doses de nitrogênio e enxofre, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelos autores, (2024).

Resultados semelhantes foram observados por Penckowski et al. ⁽⁵¹⁾, que relataram uma redução no número de queda em trigo à medida que as doses de nitrogênio aumentaram, o que pode estar relacionado a um desequilíbrio no teor de amido ou à aceleração do processo



de degradação enzimática. Essa relação negativa reforça a importância de doses equilibradas de nitrogênio para preservar as características desejáveis da farinha.

Além disso, os valores observados neste estudo permanecem dentro da classe de trigo melhorador (mínimo de 250 segundos), indicando que, mesmo com alterações nutricionais, a qualidade tecnológica do trigo foi mantida em um nível elevado. Esse resultado é especialmente relevante para a indústria, que utiliza o número de queda como um parâmetro essencial para classificar as farinhas e atender às especificidades de produção alimentícia.

As qualidades tecnológicas, nutricionais e químicas dos grãos de trigo, que influenciam diretamente na qualidade da farinha, são impactadas por práticas de manejo, como a adubação nitrogenada. Khalid et al. ⁽⁵²⁾ destacaram que tanto o clima quanto as condições de cultivo também desempenham papéis fundamentais, o que explica a variabilidade nos resultados e reforça a necessidade de uma abordagem integrada para otimizar a qualidade final do trigo.

Considerações Finais

O desempenho agrônômico e a qualidade tecnológica do trigo irrigado cultivado sob condições do Cerrado apresentou interação entre as doses de nitrogênio e de enxofre e são influenciados pelas doses de nitrogênio entre 176 a 280 kg ha⁻¹ e doses de enxofre entre 38 à 100 kg ha⁻¹.

Referências

1 Vitti GC, Otto R, Saviato J. Manejo do enxofre na agricultura. *Informações Agrônomicas*. 2015; 152:1–14.

2 Malavolta E, Moraes MF. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral de plantas cultivadas. In: Yamada T, Abdalla SRS, Vitti GC, editors. *Simpósio sobre Nitrogênio e Enxofre na Agricultura Brasileira*. Piracicaba, SP: IPNI Brasil; 2007. p. 189–249.

3 Coêlho JD. Trigo: produção e mercados. *Caderno Setorial ETENE*. 2021; 151:1–13.

4 Paludo JTS, Bonfim-Silva EM, Silva TJA da, Meneghetti LAM, Oliveira NPR de. Nitrogen and potassium interaction in oxisol soils under BRS 394 wheat cultivation. *Revista Caatinga*. 2024;37. doi: 10.1590/1983-21252024v3711728rc.



5 Waring EF, Perkowski EA, Smith NG. Soil nitrogen fertilization reduces relative leaf nitrogen allocation to photosynthesis. *J Exp Bot.* 2023; 74:5166–5180. doi: 10.1093/JXB/ERAD195.

6 Belete F, Dechassa N, Molla A, Tana T. Effect of split application of different N rates on productivity and nitrogen use efficiency of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agric Food Secur.* 2018; 7:92. doi: 10.1186/s40066-018-0242-9.

7 Ghafoor I, Rahman MH ur, Hasnain MU, Ikram RM, Khan MA, Iqbal R, Hussain MI, Sabagh A EL. Effect of slow-release nitrogenous fertilizers on dry matter accumulation, grain nutritional quality, water productivity and wheat yield under an arid environment. *Sci Rep.* 2022; 12:14783. doi: 10.1038/s41598-022-18867-5.

8 Moreira HKS, Pereira Uchôa SC, Alvarez Venegas VH, De Lima Matos CH, Ferreira Melo V, Alves JMA, José Silva A. Sulfur doses and pH on the dynamics of S in the soil labile reserve. *REVISTA AGRO@MBIENTE ON-LINE.* 2024; 18:1–15. doi: 10.18227/1982-8470ragro.v18i00.8231.

9 Nicchio B, Rodrigues MV, Vieira MAM, Pereira HS, Korndörfer GH. The use of phosphates associated with sulfur sources applied in a dystrophic red oxisol cultivated with sugarcane. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research.* 2021;4:5215–5234. doi: 10.34188/bjaerv4n4-026.

10 Pias OH de C, Tiecher T, Cherubin MR, Mazurana M, Bayer C. Crop Yield Responses to Sulfur Fertilization in Brazilian No-Till Soils: a Systematic Review. *Rev Bras Cienc Solo.* 2019;43. doi: 10.1590/18069657rbc20180078.

11 Camponogara JD, Follmann DN, Pereira AC, Nied AH, Klimaczewski CV, Santos ED dos, Mieth FM, Rosa GB da. Cálcio, Enxofre e Boro como adubação complementar de base associado ao desempenho agrônômico da cultura do trigo. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible.* 2024;17:e1536. doi: 10.55905/rdelosv17.n57-002.

12 Santos HG, Jacomine PK, dos Anjos LHC, de Oliveira VÁ, Lumbreras JF, Coelho MR, de Almeida JA, de Araújo Filho JC, de Oliveira JB, Cunha TJF. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5th ed. Brasília, DF: Embrapa; 2018.

13 Littell RC, Mott GO. Computer assisted design and analysis of response surface experiments in agronomy. *Soil and Crop Society of Florida Proceedings.* 1975; 34:94–97.

14 Cecon PR, Silva AR. Introdução à metodologia de superfícies de resposta. Viçosa: UFV; 2011.

15 Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO Irrigation and Drainage Paper, 56; 1998.



- 16 Box GEP, Draper NR. Response surfaces, mixtures, and ridge analyses. 2nd ed. Response surfaces, mixtures, and ridge analyses: Wiley-Interscience; 2007.
- 17 Cirillo MA. Otimização na Experimentação. 1st ed. Lavras: Lavras; 2015.
- 18 R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Viena, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2018.
- 19 Lenth VR. Response-Surface Methods in R, Using rsm. J Stat Softw. 2009; 32:1–17.
- 20 Ferreira DF. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. Revista Brasileira de Biometria. 2019; 37:529–535. doi: 10.28951/rbb.v37i4.450.
- 21 Melero MM, Gitti D de C, Arf O, Rodrigues RAF. Coberturas vegetais e doses de nitrogênio em trigo sob sistema plantio direto. Pesqui Agropecu Trop. 2013; 43:343–353. doi: 10.1590/S1983-40632013000400001.
- 22 Li H, Wang H, Fang Q, Jia B, Li D, He J, Li R. Effects of irrigation and nitrogen application on NO₃-N distribution in soil, nitrogen absorption, utilization and translocation by winter wheat. Agric Water Manag. 2023; 276:108058. doi: 10.1016/j.agwat.2022.108058.
- 23 Pietro-Souza W, Bonfim-Silva EM, Schlichting AF, Silva M de C. Desenvolvimento inicial de trigo sob doses de nitrogênio em Latossolo Vermelho de Cerrado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2013; 17:575–580. doi: 10.1590/S1415-43662013000600001.
- 24 Batista K, Monteiro FA. Sistema radicular do capim-Marandu, considerando as combinações de doses de nitrogênio e de enxofre. Rev Bras Cienc Solo. 2006; 30:821–828. doi: 10.1590/S0100-06832006000500008.
- 25 He L, Li H, He J, Han D, Li R, Wang H. Irrigation at appearance of top 2nd or flag leaf could improve canopy photosynthesis by regulating light distribution and LAI at each leaf layer. Field Crops Res. 2023; 295:108883. doi: 10.1016/j.fcr.2023.108883.
- 26 Wang R, Wang Y, Hu Y, Dang T, Guo S. Divergent responses of tiller and grain yield to fertilization and fallow precipitation: Insights from a 28-year long-term experiment in a semiarid winter wheat system. J Integr Agric. 2021; 20:3003–3011. doi: 10.1016/S2095-3119(20)63296-8.
- 27 Nunes A da S, Souza LCF de, Vitorino ACT, Mota LH de S. Adubos verdes e doses de nitrogênio em cobertura na cultura do trigo sob plantio direto. Semin Cienc Agrar. 2011; 32:1375–1384. doi: 10.5433/1679-0359.2011v32n4p1375.
- 28 Salvagiotti F, Castellarín JM, Miralles DJ, Pedrol HM. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. Field Crops Res. 2009; 113:170–177. doi: 10.1016/j.fcr.2009.05.003.



29 Ali AA, Arshadullah M, Hyder SI, Mahmood IA. Effect of different levels of sulfur on the productivity of wheat in a saline sodic soil. *Soil Environ* [Internet]. 2012; 31:91–95.

30 Teixeira Filho MCM, Buzetti S, Andreotti M, Arf O, Benett CGS. Doses, fontes e épocas de aplicação de nitrogênio em trigo irrigado em plantio direto. *Pesqui Agropecu Bras*. 2010; 45:797–804. doi: 10.1590/S0100-204X2010000800004.

31 Mohamed AH, Abd El-Megeed FH, Hassanein NM, Youseif SH, Farag PF, Saleh SA, Abdel-Wahab BA, Alsuhaibani AM, Helmy YA, Abdel-Azeem AM. Native Rhizospheric and Endophytic Fungi as Sustainable Sources of Plant Growth Promoting Traits to Improve Wheat Growth under Low Nitrogen Input. *Journal of Fungi*. 2022; 8:94. doi: 10.3390/jof8020094.

32 Zhang H, Zhao Q, Wang Z, Wang L, Li X, Fan Z, Zhang Y, Li J, Gao X, Shi J, et al. Effects of Nitrogen Fertilizer on Photosynthetic Characteristics, Biomass, and Yield of Wheat under Different Shading Conditions. *Agronomy*. 2021; 11:1989. doi: 10.3390/agronomy11101989.

33 Saad AM, Alabdali AYM, Ebaid M, Salama E, El-Saadony MT, Selim S, Safhi FA, ALshamrani SM, Abdalla H, Mahdi AHA, et al. Impact of Green Chitosan Nanoparticles Fabricated from Shrimp Processing Waste as a Source of Nano Nitrogen Fertilizers on the Yield Quantity and Quality of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars. *Molecules*. 2022;27. doi: 10.3390/molecules27175640.

34 Vettorazzi J, Teixeira Filho MCM, Galindo FS, Dupas E, Yano ÉH, Buzetti S. Does the nitrogen rates, methods and times of application influences the corn nutrition and yield? *Journal of Agricultural Science*. 2019; 11:350. doi: 10.5539/jas.v11n1p350.

35 Malavolta E, Vitti GC, Oliveira SA. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2nd ed. Piracicaba,SP: Associação Brasileira de Potassa e do Fósforo; 1997.

36 Wrobel FL, Neumann M, Leão GFM, Horst EH, Kyoshi Ueno R. Doses de nitrogênio sobre produtividade e aspectos nutricionais de grãos e palha de trigo duplo propósito. *Revista Acadêmica Ciência Animal*. 2016; 14:27. doi: 10.7213/academica.14.2016.03.

37 Boschini APM, Silva CL da, Oliveira CA da S, Oliveira Júnior MP de, Miranda MZ de, Fagioli M. Aspectos quantitativos e qualitativos do grão de trigo influenciados por nitrogênio e lâminas de água. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2011; 15:450–457. doi: 10.1590/S1415-43662011000500003.

38 Cantarella H. Nitrogênio. In: Novais RF, Alvarez VH, Cantarutti RB, Neves JCL, editors. *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p. 375–470.

39 Randall PJ, Spencer K, Freney JR. Sulphur and nitrogen fertilization effects on wheat. I Concentration of sulphur and nitrogen to sulphur ratio in relation to yield response. Sulphur and nitrogen fertilization effects on wheat I Concentration of sulphur and nitrogen to sulphur ratio in relation to yield response. 1981; 32:203–2012.



- 40 Zhao F, Salmon S, Withers P, Monaghan J, Evans E, Shewry P, McGrath S. Variation in the Breadmaking Quality and Rheological Properties of Wheat in Relation to Sulphur Nutrition under Field Conditions. *J Cereal Sci.* 1999; 30:19–31. doi: 10.1006/jcrs.1998.0244.
- 41 Alves MJF, Teixeira WWR, Daros E, Cassol LC, Pascoalino JAL, de Moraes MF. Productive performance of wheat based on nitrogen fertilization in coverage. *Am J Plant Sci.* 2015; 06:1587–1593. doi: 10.4236/ajps.2015.69159.
- 42 Elli EF, Caron BO, Medeiros SLP, Eloy E, Monteiro GC, Schmidt D. Effects of growth reducer and nitrogen fertilization on morphological variables, SPAD index, interception of radiation and productivity of wheat. *Revista Ceres.* 2015; 62:577–582. doi: 10.1590/0034-737X201562060010.
- 43 Bonfim-Silva EM, Freitas DC de, Silva TJA da, Fenner W, Sousa HH de F. Morphological development and yield of wheat irrigated under nitrogen and potassium fertilization in Cerrado Oxisol. *Aust J Crop Sci.* 2018; 12:1465–1471. doi: 10.21475/ajcs.18.12.09.PNE1142.
- 44 El-Sobky E-SEA. Effect of burned rice straw, phosphorus and nitrogen fertilization on wheat (*Triticum aestivum* L.). *Annals of Agricultural Sciences.* 2017; 62:113–120. doi: 10.1016/j.aogas.2017.05.007.
- 45 Abdenaceur R, Farida B, Mourad D, Rima H, Zahia O, Fatma S-H. Effective biofertilizer *Trichoderma* spp. isolates with enzymatic activity and metabolites enhancing plant growth. *International Microbiology.* 2022; 25:817–829. doi: 10.1007/s10123-022-00263-8.
- 46 Belkebla N, Bessai SA, Melo J, Caeiro MF, Cruz C, Nabti E. Restoration of *Triticum aestivum* Growth under Salt Stress by Phosphate-Solubilizing Bacterium Isolated from Southern Algeria. *Agronomy.* 2022; 12:2050. doi: 10.3390/agronomy12092050.
- 47 Zhang Z, Yu Z, Zhang Y, Shi Y. Impacts of Fertilization Optimization on Soil Nitrogen Cycling and Wheat Nitrogen Utilization Under Water-Saving Irrigation. *Front Plant Sci.* 2022;13. doi: 10.3389/fpls.2022.878424.
- 48 Zagonel J, Fernandes EC. Doses e épocas de aplicação de redutor de crescimento afetando cultivares de trigo em duas doses de nitrogênio. *Planta Daninha.* 2007; 25:331–339. doi: 10.1590/S0100-83582007000200013.
- 49 Bonfim-Silva EM, Monteiro FA, Silva TJA da. Nitrogênio e enxofre na produção e no uso de água pelo capim-braquiária em degradação. *Rev Bras Cienc Solo.* 2007; 31:309–317. doi: 10.1590/S0100-06832007000200013.
- 50 Souza EJ, Cunha FF da, Magalhães FF, Silva TR da, Santos OF da. Eficiência do uso da água pelo milho doce em diferentes lâminas de irrigação e adubação nitrogenada em cobertura. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada.* 2016; 10:750–757. doi: 10.7127/rbai.v10n400396.



51 Penckowski LH, Zagonel J, Fernandes EC. Qualidade industrial do trigo em função do trinexapac-ethyl e doses de nitrogênio. *Ciência e Agrotecnologia*. 2010; 34:1492–1499. doi: 10.1590/S1413-70542010000600020.

52 Khalid A, Hameed A, Tahir MF. Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. *Front Nutr*. 2023;10. doi: 10.3389/fnut.2023.1053196.



10.31072/rcf.v17i1.1497

Este é um trabalho de acesso aberto e distribuído sob os Termos da *Creative Commons Attribution License*. A licença permite o uso, a distribuição e a reprodução irrestrita, em qualquer meio, desde que creditado as fontes originais.



BY

Open Access