

**UniRV - UNIVERSIDADE DE RIO VERDE**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**ADUBAÇÃO FOSFATADA E NITROGENADA NO SORGO**  
**GRANÍFERO EM SUCESSÃO À SOJA**

**ARTHUR CUNHA FRANÇA**  
*Magister Scientiae*

**RIO VERDE**  
**GOIÁS – BRASIL**  
**2026**

**ARTHUR CUNHA FRANÇA**

**ADUBAÇÃO FOSFATADA E NITROGENADA NO SORGO GRANÍFERO EM  
SUCESSÃO À SOJA**

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para à obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**RIO VERDE  
GOIÁS – BRASIL  
2026**

Universidade de Rio Verde  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – (CIP)

F881a      França, Arthur Cunha

Adubação fosfatada e nitrogenada no sorgo granífero em sucessão à soja.  
/ Arthur Cunha França. – 2026.  
52 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Guerra da Silva.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Rio Verde - UniRV, Programa  
de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Faculdade de Agronomia, 2026.

Inclui índice de figuras e tabelas.

1. Sorgo granífero. 2. Produtividade de grãos. 3. Nutrição mineral. 4.  
*Sorghum bicolor*. 5. Fertilizantes. I. Silva, Alessandro Guerra da. II. Título.

CDD: 631.84

Biblioteca Luiza Carlinda de Oliveira  
Bibliotecário: Juatan Tiago da Silva – CRB 1/3158

ARTHUR CUNHA FRANÇA

**“ADUBAÇÃO FOSFATADA E NITROGENADA NO SORGO GRANÍFERO EM  
SUCESSÃO À SOJA”**

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

APROVAÇÃO: 25 de agosto de 2026



Documento assinado digitalmente

ALESSANDRO GUERRA DA SILVA  
Data: 26/08/2026 09:34:09-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Alessandro Guerra da Silva  
Presidente da Banca Examinadora  
PPGPV – UniRV



Documento assinado digitalmente

MARCIO ROSA  
Data: 27/08/2026 17:10:21-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Marcio Rosa  
Membro - PPGPV/UniRV



Documento assinado digitalmente

AILDSON PEREIRA DUARTE  
Data: 30/08/2026 21:47:18-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Pesq. Dr. Aildson Pereira Duarte  
Membro externo - IAC



Documento assinado digitalmente

KATIA APARECIDA DE PINHO COSTA  
Data: 26/08/2026 15:07:14-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profa. Dra. Kátia Aparecida de Pinho Costa  
Membro externo - IF Goiano



Documento assinado digitalmente

ADRIANO CARVALHO COSTA  
Data: 27/08/2026 15:39:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Adriano Carvalho Costa  
Membro externo - IF Goiano

## **DEDICATÓRIA**

A Deus, a minha família, ao meu orientador e aos meus amigos, pelo apoio e pelos conselhos, que me ensinaram a dar valor ao esforço e à pesquisa.

## **AGRADECIMENTOS**

É impossível citar aqui os nomes de todos que me auxiliaram a tornar este trabalho possível. Todavia, na tentativa de lembrar de alguns, seguem os meus agradecimentos:

Ao meu orientador Prof. Alessandro Guerra da Silva, pelos ensinamentos e pela orientação;

Aos professores: Márcio Rosa, Camila Jorge Bernabé Ferreira Braz, Eduardo Lima do Carmo, Gilmar Oliveira Santos, Givanildo Zildo da Silva, Gustavo André Simon, June Faria Scherrer Menezes, Guilherme Braga Pereira Braz, Hercules Diniz Campos, Matheus De Freitas Souza, Mayara Cristina Lopes, Paulo Fernandes Boldrin, Rose Luiza Moraes Tavares, Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão, pelos valiosos ensinamentos;

Ao professor Aildson Pereira Duarte do Instituto Agronômico de Campinas, pelos ensinamentos e pelo apoio na realização da pesquisa;

A Helix Sementes, por proporcionar as sementes e a área para desenvolvimento do trabalho de pesquisa e a Mosaic, pela disponibilização dos fertilizantes e

Aos colegas Júlia Vilela Carvalho, Hector Torres Rampelotti, Gilclésio Martins Pereira Filho e Pedro Henrique Silva Vargas, por terem me apoiado no experimento de campo.

*“O SENHOR é o meu pastor; nada me faltará. Ele me faz repousar em pastos verdejantes. Leva-me para junto das águas de descanso; refrigera-me a alma. Guia-me pelas veredas da justiça por amor do seu nome. Ainda que eu ande pelo vale da sombra da morte, não temerei mal nenhum, porque tu estás comigo; o teu bordão e o teu cajado me consolam. Preparas-me uma mesa na presença dos meus adversários, unges a minha cabeça com óleo; o meu cálice transborda. Bondade e misericórdia certamente me seguirão todos os dias da minha vida; e habitarei na Casa do SENHOR para todo o sempre”.*

*(23:1-6)*

*"Toda a nossa ciência, medida contra a realidade, é primitiva e infantil — e ainda assim é a coisa mais preciosa que temos."*

*(Albert Einstein)*

## **BIOGRAFIA**

ARTHUR CUNHA FRANÇA, filho de Adna Ferreira da Cunha França e Valtinho Carvalho França, nasceu no dia 20 de dezembro de 2001, em Rio Verde, Goiás. Em 2020, ingressou no Curso de Agronomia da Universidade de Rio Verde, graduando-se em dezembro de 2023. Iniciou o curso de mestrado em Produção Vegetal pela UniRV - Universidade de Rio Verde, em fevereiro de 2024.

## SUMÁRIO

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| LISTA DE FIGURAS.....                                                                                         | vi  |
| LISTA DE TABELAS.....                                                                                         | vii |
| RESUMO.....                                                                                                   | ix  |
| ABSTRACT.....                                                                                                 | x   |
| 1 INTRODUÇÃO.....                                                                                             | 1   |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA.....                                                                                  | 2   |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS.....                                                                                     | 5   |
| 4 RESULTADOS.....                                                                                             | 12  |
| 4.1 Análise de componentes principais e gradientes multivariados do sistema.....                              | 12  |
| 4.2 Efeitos dos fatores experimentais sobre os escores dos componentes principais e variáveis produtivas..... | 16  |
| 4.3 Correlação entre componentes e variáveis produtivas.....                                                  | 23  |
| 4.4 Capacidade preditiva dos componentes principais nas variáveis produtivas.....                             | 25  |
| 5 DISCUSSÃO.....                                                                                              | 30  |
| 6 CONCLUSÕES.....                                                                                             | 34  |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                                                               | 35  |

## LISTA DE FIGURAS

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1 | Valores de temperatura máxima, média e mínima, e de precipitação durante o desenvolvimento das plantas do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 (a) e 2024 (b).....                                                                           | 6  |
| FIGURA 2 | Correlação entre as variáveis produtividade de grãos (PROD), número de grãos por panícula (NGP), peso de mil grãos (PMG) e índice de colheita (IC) e os doze componentes principais (CP) do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024..... | 25 |
| FIGURA 3 | Efeitos dos componentes principais (CP1–CP12) nas características produtivas e descrição dos gradientes multivariados associados referentes ao ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024.                                                  | 29 |

## LISTA DE TABELAS

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1 | Resultados das análises química e física do solo do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024.....                                                                                                                                                                                                                                                      | 7  |
| TABELA 2 | Quantidade de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 8  |
| TABELA 3 | Correlações entre as variáveis fisiológicas, nutricionais e agronômicas e os componentes principais (CP1–CP12) com autovalores, variância explicada e variância acumulada da análise de componentes principais (PCA) do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada, em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024....                                                                                  | 14 |
| TABELA 4 | Valores de p da ANOVA dos escores dos componentes principais (CP1–CP12) e das variáveis produtividade de grãos (PROD), número de grãos por panícula (NGP), peso de mil grãos (PMG) e índice de colheita (IC) em função do fertilizante na semeadura (F), nitrogênio em cobertura (N) e das safras (S) do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024..... | 18 |
| TABELA 5 | Médias ajustadas e desdobramento da interação significativa entre fertilizante e safra nos escores dos componentes principais CP1, CP4 e CP10, e nas variáveis produtividade de grãos (PROD) e número de grãos por panícula (NGP) do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024.....                                                                     | 19 |
| TABELA 6 | Médias ajustadas e desdobramento da interação significativa entre nitrogênio em cobertura e safras nos escores dos componentes principais CP3 e CP6 e para o índice de colheita (IC), e efeitos principais do nitrogênio em cobertura para CP8 e CP10 e para a produtividade de grãos (PROD) do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024.....          | 21 |

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 7 | Médias ajustadas e desdobramento da interação significativa entre fertilizante e nitrogênio em cobertura nos escores do componente principal CP5 e de fertilizantes para CP3 e CP8 do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024..... | 22 |
| TABELA 8 | Médias ajustadas e desdobramento da interação tripla significativa entre fertilizantes na semeadura, adubação nitrogenada em cobertura e safras para o peso de mil grãos do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024.....           | 23 |
| TABELA 9 | Coeficientes de regressão e de determinação ( $R^2$ ) para produtividade de grãos (PROD), número de grãos por panícula (NGP), peso de mil grãos (PMG) e índice de colheita (IC) do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024.....    | 27 |

## RESUMO

FRANÇA, A. C. **Adubação fosfatada e nitrogenada no sorgo granífero em sucessão à soja.** UniRV - Universidade de Rio Verde. Dissertação de Mestrado em Produção Vegetal. Universidade de Rio Verde. 57p. 2026.

O sorgo granífero é amplamente cultivado em sucessão à soja na região Central do Brasil, ficando sujeito a restrições hídricas durante o seu ciclo. Adicionalmente, o manejo nutricional da cultura é frequentemente negligenciado pelos produtores, sobretudo quanto ao suprimento de N e P. Como a resposta do sorgo à adubação envolve múltiplos processos fisiológicos, nutricionais e produtivos, análises univariadas podem ser insuficientes para uma interpretação integrada. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de fontes de fertilizantes na semeadura, associadas ou não à aplicação de N em cobertura, sobre as variáveis fisiológicas, nutricionais e agronômicas do sorgo granífero, utilizando a análise de componentes principais (PCA). O experimento foi conduzido em Rio Verde, Estado de Goiás, no delineamento de blocos casualizados em arranjo fatorial  $6 \times 2 \times 2$ , correspondendo a seis tratamentos de semeadura (Controle, Ureia, Superfosfato Triplo, Superfosfato Simples, Fosfato Monoamônio + Ureia e S15) associados ou não à aplicação de N em cobertura e dois anos de safra. A PCA permitiu reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados com a retenção de doze componentes principais, os quais explicaram parte substancial da variabilidade total. O CP3, associado à biomassa seca e ao acúmulo de nutrientes, apresentou as maiores associações com os componentes de produtividade, correlacionando-se negativamente com a produtividade de grãos, o número de grãos por panícula e o peso de mil grãos. Os modelos de regressão múltipla demonstraram capacidade explicativa moderada ( $R^2$  entre 0,5075 e 0,5999), sendo a produtividade de grãos a variável de maior ajuste ( $R^2 = 0,5999$ ), fortemente influenciada pelo acúmulo de nutrientes e pigmentos fotossintéticos. Os fertilizantes S15, Super Simples e Fosfato Monoamônio + Ureia promoveram maior número de grãos por panícula e produtividade de grãos na safra 2023. A abordagem multivariada identificou as divergências fisiológicas e nutricionais que governam o desempenho agrônomo, evidenciando a necessidade de integrar atributos fisiológicos, nutricionais e agrônomo na determinação da produtividade do sorgo granífero.

**Palavras-chave:** Análise multivariada, análise de componentes principais, produtividade de grãos, nutrição mineral, *Sorghum bicolor*.

## ABSTRACT

FRANÇA, A. C. **Phosphate and nitrogen fertilization of grain sorghum in succession to soybean.** UniRV - University of Rio Verde. Master's Thesis in Plant Production. University of Rio Verde. 57 p. 2026.

Grain sorghum is widely cultivated in succession to soybean in Central Brazil, making it susceptible to water stress during its growth cycle. Furthermore, crop nutritional management is often neglected by growers, particularly regarding nitrogen (N) and phosphorus (P) supply. Since the crop's response to fertilization involves multiple physiological, nutritional, and productive processes, univariate analyses may be insufficient for an integrated interpretation. Thus, this study aimed to evaluate the influence of fertilizer sources applied at sowing—combined or not with top-dressed N—on the physiological, nutritional, and agronomic variables of grain sorghum using principal component analysis (PCA). The experiment was conducted in Rio Verde, Goiás state, using a randomized complete block design in a 6×2×2 factorial arrangement, comprising six sowing treatments (Control, Urea, Triple Superphosphate, Single Superphosphate, Monoammonium Phosphate + Urea, and S15), with or without top-dressed N, over two growing seasons. PCA enabled dimensionality reduction of the dataset by retaining twelve principal components, which explained a substantial portion of the total variability. PC3, associated with dry biomass and nutrient accumulation, showed the strongest associations with yield components, correlating negatively with grain yield, number of grains per panicle, and thousand-grain weight. Multiple regression models demonstrated moderate explanatory power ( $R^2$  between 0.5075 and 0.5999), with grain yield showing the best fit ( $R^2 = 0.5999$ ), strongly influenced by nutrient accumulation and photosynthetic pigments. The S15, Super Simple, and Monoammonium Phosphate + Urea fertilizers promoted a higher number of grains per panicle and greater grain yield during the 2023 growing season. The multivariate approach identified the physiological and nutritional divergences governing agronomic performance, highlighting the need to integrate physiological, nutritional, and agronomic attributes when determining grain sorghum yield.

**Keywords:** Multivariate analysis, principal component analysis, grain yield, mineral nutrition, \*Sorghum bicolor\*.

## 1 INTRODUÇÃO

O sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) é um dos principais cereais cultivados no mundo, sendo os grãos utilizados para alimentação humana, animal e recentemente para produção de etanol. Características como ampla adaptação a diferentes condições ambientais, associada à elevada tolerância ao déficit hídrico e às altas temperaturas, torna essa espécie particularmente importante para o cultivo em regiões sujeitas a déficits hídricos, como ocorre nos cultivos de sucessão a soja na região central do Brasil.

Apesar de seu elevado potencial produtivo, a obtenção de maiores produtividades de grãos depende diretamente da eficiência dos processos fisiológicos e nutricionais, que contribuem para a formação dos componentes de produtividade. Entre as práticas de manejo no sorgo, a adubação destaca-se como um dos principais quando se objetiva maiores produtividades. Apesar de negligenciada por alguns produtores, essa prática contribui para a maior absorção de nutrientes e melhorias na atividade fotossintética, contribuindo para o desenvolvimento da planta, o acúmulo de biomassa e a produção de grãos.

Entretanto, a resposta do sorgo à adubação não ocorre de forma isolada. Alterações na disponibilidade de nutrientes podem modificar simultaneamente atributos relacionados ao teor de pigmentos fotossintéticos, à fluorescência da clorofila, ao acúmulo de biomassa como também à absorção e mobilização de nutrientes na planta. Sendo assim, a produtividade passa a representar o resultado de uma complexa rede de interações fisiológicas, nutricionais e morfológicas que atuam de forma integrada ao longo do ciclo da cultura.

Apesar do conhecimento sobre a importância dos nutrientes, há escassez de informações atualizadas sobre a resposta do sorgo à adubação quando cultivado em sucessão à soja, especialmente quanto ao uso combinado de fontes fosfatadas e nitrogenadas na semeadura e à aplicação de N em cobertura. Considerando a variabilidade climática da safrinha e o aporte residual de N proveniente da palhada de soja, é necessário avaliar os efeitos fisiológicos, nutricionais e agronômicos em diferentes estratégias de adubação. Neste contexto, análises multivariadas possibilitam a simplificação de conjuntos complexos de informações em componentes interpretáveis, tornando compreensíveis as relações entre as características analisadas na cultura.

Diante disso, este trabalho teve como objetivo investigar, por meio da análise de componentes principais, a integração entre variáveis fisiológicas, nutricionais e agronômicas

associadas à produtividade de grãos do sorgo granífero implantado na segunda safra em diferentes formulações de fertilizantes associadas à adubação nitrogenada em cobertura.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

No continente americano, o sorgo é cultivado principalmente para suprir a demanda das cadeias de produção de carne e leite, sendo usado também, para alimentação humana e para produção de etanol. Além destes usos, recentemente, países como o Brasil têm exportado os grãos para a Ásia para atender à crescente demanda populacional. Apesar do alto potencial produtivo de híbridos modernos de sorgo, a produtividade nacional é baixa (aproximadamente 3.500 kg ha<sup>-1</sup>) devido à implantação além da época ideal, ocupação de áreas marginais e uso reduzido de insumos, em especial fertilizantes (CONAB, 2026).

Devido à boa adaptação às condições de cultivo em regiões com menor precipitação e à adaptação a altas temperaturas e à insensibilidade ao fotoperíodo, o sorgo granífero tem sido cultivado em sucessão à soja na região Central do Brasil. Nesta época, há redução de precipitação, radiação e temperatura. No entanto, devido as suas características, a cultura tem maior flexibilidade para semeadura na segunda safra (Pale *et al.* 2003), com adequado desempenho quando devidamente manejada (Oliveira *et al.*, 2020). Além do mais, o sorgo apresenta mecanismos morfofisiológicos que favorecem o uso da água e de nutrientes em profundidade, como o maior comprimento radicular, o que contribui para a manutenção do crescimento sob déficit hídrico (Bheemanahalli *et al.*, 2019; Reyes *et al.*, 2023). A interação entre maior disponibilidade de nutrientes e desenvolvimento radicular pode potencializar a absorção e, conseqüentemente, a produtividade de grãos (Reyes *et al.*, 2023). Em condições não limitantes, produtividades superiores a 7.000 kg ha<sup>-1</sup> já foram relatadas, evidenciando o ganho potencial associado ao manejo nutricional adequado (Schlegel *et al.*, 2021).

A elevada capacidade fotossintética do sorgo granífero fundamenta-se no mecanismo C4 e na anatomia Kranz, estratégias que promovem a concentração de CO<sub>2</sub> nas células da bainha do feixe vascular e reduzem a fotorrespiração (Olanrewaju *et al.*, 2025; Ortiz *et al.*, 2022). Em cenários de estresse abiótico, a resposta fotossintética da cultura transita dinamicamente entre a regulação estomática defensiva e a readequação fotoquímica do aparelho fotossintético.

Esse mecanismo de concentração de carbono minimiza a atividade oxigenase da enzima RuBisCO ao saturá-la com CO<sub>2</sub> no tecido condutor (Ortiz *et al.*, 2022). A fixação primária é catalisada nas células do mesófilo pela fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPC), enzima com altíssima afinidade pelo CO<sub>2</sub>. Sob condições normais ou de estresse hídrico moderado, a saturação da taxa assimilatória líquida (*A*) ocorre mesmo sob baixas concentrações

intercelulares de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ), permitindo à planta manter elevadas taxas de fixação de carbono aliadas a uma reduzida abertura estomática (Olanrewaju et al., 2025; Ortiz et al., 2022).

Diante do estresse hídrico, o sorgo induz um rápido declínio na condutância estomática ( $g_s$ ), mediado pela sinalização do ácido abscísico (ABA), para conter a perda transpiratória (Netondo et al., 2022; Tariq et al., 2023). Como a PEPC mantém a fixação eficiente de carbono mesmo sob reduzido  $C_i$ , a queda na transpiração ocorre proporcionalmente mais rápido do que a diminuição da assimilação de carbono. Esse ajuste eleva temporariamente a eficiência intrínseca no uso da água ( $\text{EUA}_i$ ), maximizando o ganho de carbono por unidade de água perdida antes que o estresse comprometa criticamente o potencial hídrico foliar (Netondo et al., 2022; Tariq et al., 2023; Zhang et al., 2024).

Por outro lado, em cenários de estresse severo, prolongado ou combinado (como a seca associada ao estresse térmico), as limitações não-estomáticas (bioquímicas e fotoquímicas) passam a ser as principais responsáveis pela inibição da fotossíntese (Olanrewaju et al., 2025; Zhang et al., 2024). O excesso de radiação luminosa não processada na fixação de carbono favorece a geração de espécies reativas de oxigênio (ROS). Isso provoca a perda de integridade das membranas dos tilacoides, a queda na eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ) e no rendimento quântico efetivo ( $\Phi_{\text{PSII}}$ ) (Ortiz et al., 2022; Zhang et al., 2024). Para dissipar o excesso de energia e mitigar a fotoinibição, o sorgo ativa mecanismos fotoprotetores como a dissipação não-fotoquímica (NPQ), ancorada pelo ciclo das xantofilas via de-epoxidação da violaxantina a zeaxantina (Ortiz et al., 2022). Degradação de pigmentos. Sob estresses hídricos contínuos, ocorre a degradação acelerada da clorofila, resultando em reduções de até 36,3% nos índices SPAD. Isso diminui a interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e antecipa a senescência foliar (Zhang et al., 2024).

No âmbito agrônomo e morfofisiológico, a interação entre seca e alta temperatura afeta severamente a taxa de alongação e a distribuição de biomassa. A combinação de déficit hídrico e estresse térmico suprime o crescimento diário de raízes e brotos em até 77,6%, um impacto substancialmente superior ao observado na aplicação isolada da seca. Essa inibição sinérgica resulta no desacoplamento da relação fonte-dreno. A planta reduz a área foliar ativa para conter a transpiração e redireciona os fotoassimilados remanescentes ao crescimento radicular profundo (Olanrewaju et al., 2025; Tariq et al., 2023). Durante a fase reprodutiva, essa restrição na fonte compromete a remobilização dos carboidratos solúveis armazenados no colmo para a panícula, reduzindo a taxa de preenchimento, o peso de mil grãos e o índice de colheita final (Tariq et al., 2023).

O nitrogênio é fundamental para o crescimento vegetativo e melhorias no conteúdo nutricional da planta e teor proteico dos grãos, além de proporcionar incrementos na produtividade (Ostmeyer *et al.*, 2022; Bartzialis *et al.*, 2023). Mesmo em regiões com ocorrência de estresse hídrico, devido aos mecanismos fisiológicos de tolerância, o sorgo tem sido beneficiado pelo uso do N (Ostmeyer *et al.*, 2022). Entretanto, doses excessivas podem provocar desequilíbrios iônicos, reduzindo a disponibilidade de outros cátions, como Ca (Khalfalla *et al.*, 2024). O fósforo é igualmente essencial para o estabelecimento inicial da cultura como também no incremento de produtividade de grãos, sendo que respostas sinérgicas entre N e P são frequentemente relatadas (Dembele *et al.*, 2021; Schlegel *et al.*, 2021). Além destes, o enxofre contribui para o crescimento da planta, maior desenvolvimento da área foliar e, conseqüentemente, o acúmulo de biomassa (Oberoi *et al.*, 2023). Além disto, o elemento contribui para o maior número de grãos na panícula e no enchimento e acúmulo de proteína nos grãos (Sharma *et al.*, 2024).

O sorgo granífero exporta quantidades significativas de nitrogênio, fósforo e potássio, sendo o potássio o nutriente mais extraído, porém é o que mais retorna ao solo via ciclagem de nutrientes (Coelho, 2023). O acúmulo de matéria seca na cultura é lento nas fases iniciais, sobretudo nos primeiros 30 dias, período em que a maior parte da biomassa deriva do crescimento foliar e da diferenciação do meristema apical (Fornasieri *et al.*, 2009). A partir do início da diferenciação floral, entre 30 e 35 dias após a emergência, o sorgo passa por um crescimento acelerado, intensificando o acúmulo de matéria seca e, conseqüentemente, de nutrientes até a completa formação dos grãos (Gerik *et al.*, 2024). A adubação com N, P e K intensifica esse acúmulo e pode reduzir a duração do ciclo, favorecendo maior produtividade quando aplicada de forma adequada (Velinov *et al.*, 2019).

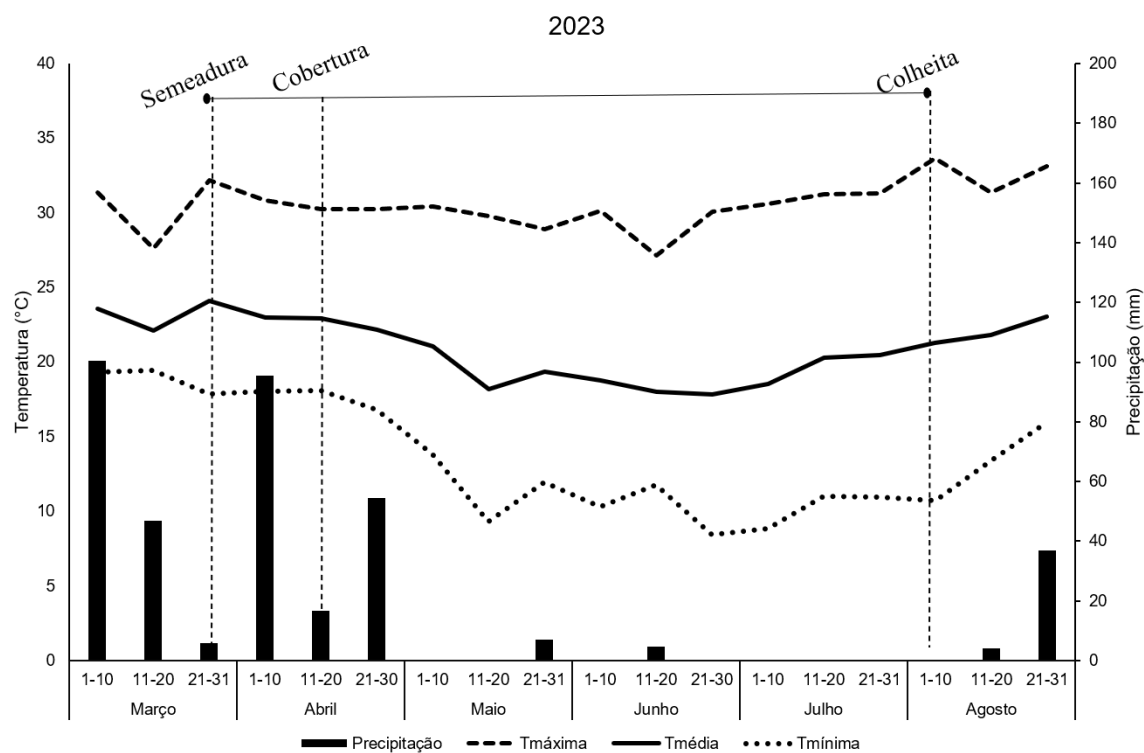
Os trabalhos de pesquisa com manejo de adubação no sorgo têm avaliado individualmente variáveis relacionadas ao crescimento, à nutrição mineral e ao desempenho produtivo da cultura. Da mesma forma, parâmetros relacionados à fisiologia da planta têm sido utilizados para monitorar alterações no aparato fotossintético e diagnosticar respostas do sorgo a diferentes condições de manejo e ambiente de cultivo. Essa limitação torna-se ainda mais relevante quando se considera que muitas variáveis agrônômicas apresentam elevada correlação entre si. Características nutricionais podem influenciar processos fisiológicos, que por sua vez influenciam o crescimento e o desenvolvimento do sorgo e os componentes de produtividade do sorgo. Desta forma, análises univariadas frequentemente não são capazes de representar adequadamente as respostas observadas em campo, dificultando a identificação das variáveis que efetivamente contribuem para aumentos na produtividade de grãos.

Nesse cenário, abordagens multivariadas são ferramentas capazes de integrar um grande número de variáveis simultaneamente. Ao considerar as características nutricionais, fisiológicas e agronômicas, permita identificar padrões ocultos de associação, reduzir a dimensionalidade dos dados e revelar variáveis ou grupo de variáveis responsáveis pelo desempenho produtivo da cultura do sorgo a campo. Neste contexto, a análise de componentes principais destaca-se por possibilitar a síntese de conjuntos complexos de informações em componentes interpretáveis, o que facilita a compreensão das relações entre os atributos fisiológicos, nutricionais e produtivos da cultura do sorgo.

Sendo assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência de fontes de fertilizantes na semeadura associada à aplicação de nitrogênio em cobertura nas variáveis fisiológicas, nutricionais e agronômicas do sorgo granífero com abordagem multivariada baseada em análise de componentes principais para explicar o desempenho produtivo da cultura na segunda safra.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos a campo nas safras 2023 e 2024 (17°44,58” W; 50°52’32” S; e 709 m de altitude; e 17°44,56” W; 50°52’31” S; e 708 m de altitude, respectivamente) no município de Rio Verde, Estado de Goiás. O sorgo foi implantado em sucessão à cultura da soja em área cultivada em sistema de plantio direto há vinte anos. Os dados climáticos durante o desenvolvimento da cultura estão apresentados na Figura 1, e a precipitação acumulada do período da safra 2023 foi de 184,4 mm e a de 2024 foi de 438,4 mm. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018), com as características químicas e físicas nas camadas de 0 a 20 cm, de 0 a 10 cm, de 10 a 20 cm e de 20 a 40 cm de profundidade apresentadas na Tabela 1.



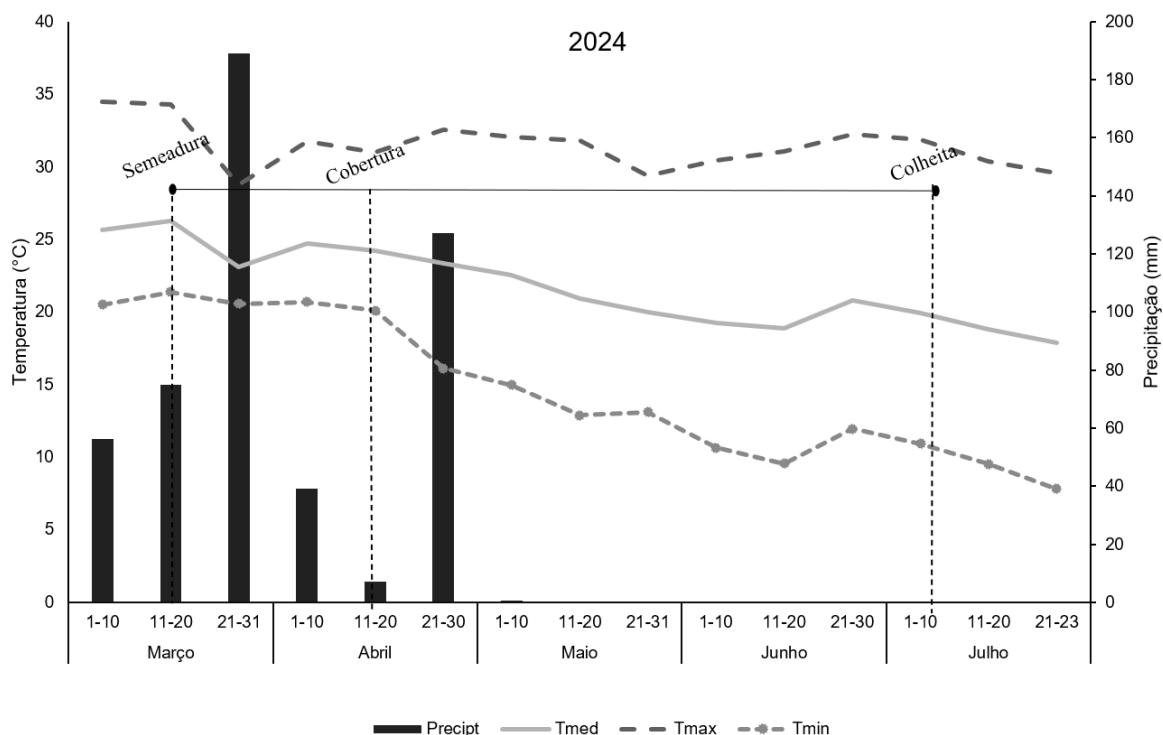


FIGURA 1 - Valores de temperatura máxima, média e mínima, e de precipitação, durante o desenvolvimento das plantas do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 (a) e 2024 (b).

TABELA 1 - Resultados das análises química e física do solo do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024

| --- 2023 ---       |                                     |                                          |                                              |                                                  |                                           |                                          |
|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|
| Profundidade<br>cm | Mat. orgânica<br>g dm <sup>-3</sup> | pH<br>-                                  | P (Mehlich)<br>mg dm <sup>-3</sup>           | K<br>mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>          | Ca<br>mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>  | Mg<br>mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> |
| 0 a 10             | 34                                  | 5,3                                      | 7                                            | 1,4                                              | 35                                        | 10                                       |
| 10 a 20            | 24                                  | 5,1                                      | 3                                            | 0,7                                              | 21                                        | 4                                        |
| 20 a 40            | 19                                  | 5,2                                      | 1                                            | 0,3                                              | 17                                        | 2                                        |
| 0 a 20             | 28                                  | 5,2                                      | 5                                            | 0,8                                              | 27                                        | 5                                        |
| Profundidade<br>cm | S<br>mg dm <sup>-3</sup>            | Al<br>mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | H + Al<br>mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | Soma bases<br>mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | CTC<br>mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | Satur. bases<br>%                        |
| 0 a 10             | 12                                  | -                                        | 36                                           | 46,4                                             | 82,4                                      | 56                                       |
| 10 a 20            | 32                                  | -                                        | 39                                           | 25,7                                             | 64,7                                      | 40                                       |
| 20 a 40            | 48                                  | -                                        | 27                                           | 19,3                                             | 46,3                                      | 42                                       |
| 0 a 20             | 22                                  | -                                        | 38                                           | 32,8                                             | 70,8                                      | 46                                       |
| Profundidade<br>cm | B<br>mg dm <sup>-3</sup>            | Cu<br>mg dm <sup>-3</sup>                | Fe<br>mg dm <sup>-3</sup>                    | Mn<br>mg dm <sup>-3</sup>                        | Zn<br>mg dm <sup>-3</sup>                 | -                                        |
| 0 a 10             | 0,28                                | 3,2                                      | 22                                           | 11,6                                             | 0,8                                       | -                                        |
| 10 a 20            | 0,26                                | 3,6                                      | 21                                           | 5,4                                              | 0,3                                       | -                                        |
| 20 a 40            | 0,23                                | 3,4                                      | 19                                           | 3,8                                              | 0,0                                       | -                                        |

|              |                     |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
|--------------|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 0 a 20       | 0,26                | 3,5                                | 22                                 | 7,6                                | 0,6                                | -                                  |
| --- 2024 --- |                     |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| Profundidade | Mat. orgânica       | pH                                 | P (Mehlich)                        | K                                  | Ca                                 | Mg                                 |
| cm           | g dm <sup>-3</sup>  | -                                  | mg dm <sup>-3</sup>                | mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> |
| 0 a 10       | 28                  | 5,2                                | 15                                 | 1,2                                | 25                                 | 7                                  |
| 10 a 20      | 24                  | 4,9                                | 6                                  | 0,7                                | 11                                 | 3                                  |
| 20 a 40      | 23                  | 5,2                                | 5                                  | 0,7                                | 9                                  | 2                                  |
| 0 a 20       | 30                  | 5,2                                | 8,9                                | 1,4                                | 16                                 | 7                                  |
| Profundidade | S                   | Al                                 | H + Al                             | Soma bases                         | CTC                                | Satur. bases                       |
| cm           | mg dm <sup>-3</sup> | mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | %                                  |
| 0 a 10       | 11                  | 0,01                               | 35                                 | 33,2                               | 68,2                               | 49                                 |
| 10 a 20      | 17                  | 0,02                               | 35                                 | 14,7                               | 49,7                               | 30                                 |
| 20 a 40      | 38                  | 0,01                               | 30                                 | 11,7                               | 41,7                               | 28                                 |
| 0 a 20       | 25                  | 0,01                               | 37                                 | 30,6                               | 67,6                               | 45                                 |
| Profundidade | B                   | Cu                                 | Fe                                 | Mn                                 | Zn                                 | -                                  |
| cm           | mg dm <sup>-3</sup> | mg dm <sup>-3</sup>                | mg dm <sup>-3</sup>                | mg dm <sup>-3</sup>                | mg dm <sup>-3</sup>                | -                                  |
| 0 a 10       | 0,17                | 2,7                                | 13                                 | 6,1                                | 1,5                                | -                                  |
| 10 a 20      | 0,15                | 2,9                                | 13                                 | 4,1                                | 0,3                                | -                                  |
| 20 a 40      | 0,44                | 2,9                                | 13                                 | 2,7                                | 0,1                                | -                                  |
| 0 a 20       | 0,12                | 2,8                                | 13                                 | 5,9                                | 0,5                                | -                                  |
| --- 2023 --- |                     |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| --- 2024 --- |                     |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| Profundidade | Areia               | Silte                              | Argila                             | Areia                              | Silte                              | Argila                             |
| cm           |                     | g kg <sup>-1</sup>                 |                                    |                                    | g kg <sup>-1</sup>                 |                                    |
| 0 a 10       | 401                 | 243                                | 356                                | 347                                | 158                                | 495                                |
| 10 a 20      | 367                 | 204                                | 429                                | 339                                | 140                                | 522                                |
| 20 a 40      | 333                 | 179                                | 488                                | 311                                | 130                                | 558                                |
| 0 a 20       | 378                 | 226                                | 396                                | 324                                | 171                                | 505                                |

\* Determinação realizada pelo Instituto Agrônômico (métodos IAC), exceto para o P Mehlich realizada na Embrapa Meio Ambiente.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso em esquema fatorial 6x2x2, com quatro repetições, correspondendo a seis tratamentos de adubação de semeadura:

TABELA 2 – Quantidade de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024

| FERTILIZANTES NA SEMEADURA - 2023-2024 |             |    |      |     |      |  |
|----------------------------------------|-------------|----|------|-----|------|--|
| Dose (kg ha <sup>-1</sup> )            |             |    |      |     |      |  |
| Tratamentos                            | Tratamentos | N  | P2O5 | K2O | S    |  |
| 1 Controle                             | -           | -  | -    | 117 | -    |  |
| 2 Excellen - Ureia (46% N)             | 65,2        | 30 | -    | 117 | -    |  |
| 3 ST (46% P2O5)                        | 165,7       | -  | 76,2 | 117 | -    |  |
| 4 SS (18,5% P2O5 e 9%S)                | 411,9       | -  | 76,2 | 117 | 37,1 |  |
| 5 MAP (11-52-00)                       | 146,5       | 16 | 76,2 | 117 | -    |  |
| 5* Ureia (46% N)                       | 30,2        | 14 | -    | -   | -    |  |
| 6 S 15 (13-33-00-15S)                  | 230,9       | 30 | 76,2 | 117 | 34,6 |  |
| Cobertura Ureia (46% N)                | 152,2       | 70 | -    | -   | -    |  |

(1-Controle; 2-ureia (46,0% de N; 65,2 Kg ha<sup>-1</sup>); 3-super fosfato triplo (46,0% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 165,7 kg ha<sup>-1</sup>); 4-superfosfato simples (17,0% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 8,0% de S; 448,2 kg ha<sup>-1</sup>) em 2023 e (18,5% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 9,0% de S; 411,9 kg ha<sup>-1</sup>) em 2024; 5-fosfato monoamônio (11,0% de N e 52,0% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 146,5 kg ha<sup>-1</sup>) + ureia (46,0% N; 30,2 kg ha<sup>-1</sup>); e 6-S15 (13,0% de N, 33% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 15% de S; 230,9 kg ha<sup>-1</sup>) associado ou não à aplicação de nitrogênio (ureia 46,0% de N; 152,0 kg ha<sup>-1</sup>) em cobertura ao lado da linha de semeadura no estágio de seis folhas completamente desenvolvidas. As doses dos fertilizantes na semeadura foram padronizadas para 76,2 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em todos os tratamentos, bem como 30,0 kg ha<sup>-1</sup> de N, exceto para o Controle e das fontes superfosfato triplo e superfosfato simples (sem N na semeadura). Também na semeadura, todas as parcelas receberam 117,0 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio (60,0% de K<sub>2</sub>O). As subparcelas eram compostas de oito linhas espaçadas de 0,5 m com 10,0 m de comprimento. A área útil foi obtida considerando as duas linhas centrais e 5,0 m de comprimento, desconsiderando 2,5 m de cada extremidade.

A adubação na semeadura foi realizada manualmente em sulcos previamente demarcados por semeadora e os adubos previamente pesados e colocados em embalagens plásticas para distribuição nos respectivos tratamentos. Posteriormente, a semeadura foi realizada mecanicamente com distribuição de dez sementes por metro do híbrido SHS 430 (híbrido granífero, precoce, arquitetura semiereta, grãos sem tanino de coloração vermelha e resistente aos pulgões *Melanaphis sacchari* e *Schizaphis graminum* biotipos C e E) em 2023 e do BM 765 (híbrido granífero, superprecoce, arquitetura semiereta, grãos sem tanino e de coloração castanho-avermelhada, presença de staygreen e resistente aos pulgões *Melanaphis sacchari* e *Schizaphis graminum* biotipos C e E) em 2024. O uso destes híbridos foi em função da representatividade de cultivo na região e disponibilidade de sementes pela empresa detentora da genética. Os tratos culturais (controle de plantas daninhas, pragas e doenças) seguiram as recomendações técnicas da cultura do sorgo.

No florescimento, foram realizadas, na área útil das parcelas, as avaliações das características fisiológicas: fluorescência e índice de clorofila. A primeira, pela determinação da fluorescência transiente “OJIP” da clorofila na quarta folha, a partir da panícula, de uma planta por parcela, com o uso de fluorômetro portátil FluorPen FP100 (Photon Systems Instruments; Drasov, Czech Republic). Nesta avaliação, uma parte da folha foi previamente adaptada ao escuro por 30 minutos por meio de clips para oxidação completa do sistema fotossintético de transporte de elétrons. Foi determinada a fluorescência mínima (Fo), em 50 µs, quando todos os centros de reação do FSII estavam abertos, definida como passo O; seguida pelo passo J (a 2 ms); passo I (a 30 ms); e passo P quando todos os centros de reação do FSII estavam fechados (fluorescência máxima - Fm). Estes

valores foram utilizados para o cálculo dos índices bioenergéticos do FSII (Strasser et al., 2000). No mesmo estágio, mas em três plantas por parcela, foram determinados ainda os índices de clorofilas, por meio do medidor portátil ClorofiLOG1030® (Falker®) para obtenção dos índices de clorofila *a*, *b*, clorofila total e relação clorofila *a* e *b*, expressos no índice Clorofilog. Estas duas avaliações foram realizadas das 09h até 11h. Também no florescimento, coletou-se a quarta folha sem a bainha a partir da panícula em dez plantas para determinação do teor de nutrientes.

Na colheita (grãos no estágio de maturidade fisiológica) determinou-se, na área útil das parcelas, as características agronômicas: a produtividade (colheita das panículas com posterior debulha e pesagem dos grãos com correção da umidade para 130 g kg<sup>-1</sup>), peso de mil grãos (contagem e pesagem de mil grãos a partir da amostra de produtividade, com correção da umidade para 130 g kg<sup>-1</sup>), peso e comprimento da panícula (respectivamente, de dez panículas aleatoriamente sendo está última determinada pela medição da base ao topo da ráquis, desconsiderando o comprimento do pedúnculo), número de grãos por panícula (contagem do número médio de grãos), população de plantas (contagem do número de plantas colhidas), número de panículas, diâmetro de colmo (medição do diâmetro no primeiro nó acima da superfície do solo com uso de um paquímetro em dez plantas aleatórias), alturas de plantas (medição do colo até a extremidade da panícula em dez plantas aleatórias), biomassa seca da parte aérea (corte rente ao solo das plantas em 1,0 m com posterior pesagem, trituração e retirada de uma amostra de aproximadamente 0,5 kg para secagem em estufa a 60°C por 72 h; posteriormente foi feita a multiplicação do peso da biomassa colhida pelo teor de massa seca, com conversão dos dados para hectare) e índice de colheita (razão do peso dos grãos pela biomassa seca da parte aérea). Também na colheita, uma amostra de 0,1 kg de grãos foi retirada para determinação nutricional. As amostras da planta inteira (folhas e grãos) foram enviadas para o laboratório para determinação de macro- e micronutrientes (Bataglia *et al.*, 1983).

Com o objetivo de sintetizar as relações das variáveis fisiológicas, nutricionais e agronômicas, foi realizada a análise de componentes principais. Nesta, foram incluídas apenas as variáveis com o autovalor maior que 1, abrangendo atributos fisiológicos, nutricionais e agronômicos. As variáveis relacionadas ao desempenho produtivo do sorgo, como produtividade de grãos, número de grãos por planta, peso de mil grãos e índice de colheita, não foram utilizadas na construção dos componentes principais, sendo tratadas como variáveis suplementares para interpretação dos resultados.

A análise foi realizada utilizando as parcelas experimentais como unidades amostrais, preservando a variabilidade existente entre os tratamentos, blocos e safras. Os dados coletados foram utilizados para compor a matriz de correlação, permitindo a avaliação conjunta de

variáveis originalmente expressas em diferentes unidades de medida. A retenção dos componentes principais foi baseada no critério de Kaiser, considerando componentes com autovalores superiores a um, complementada pela avaliação da porcentagem de variância acumulada explicada.

Após à obtenção dos componentes principais, foram calculados os escores de cada parcela experimental para os componentes retidos. Em seguida, foram determinadas as correlações entre os escores dos componentes principais e as variáveis de desempenho produtivo, com o objetivo de identificar os gradientes fisiológicos, nutricionais e agrônômicos mais associados ao desempenho produtivo do sorgo granífero. Posteriormente, os escores dos componentes principais foram utilizados como variáveis explicativas em modelos de regressão linear múltipla, tendo como variáveis dependentes a produtividade de grãos, o número de grãos por planta, o peso de mil grãos e o índice de colheita. Os modelos foram ajustados considerando os efeitos de safra e bloco experimental, conforme a estrutura geral:

$$Y = \text{SAFRA} + \text{REP} + \text{CP}_1 + \text{CP}_2 + \dots + \text{CP}_n + \varepsilon$$

Em que Y representa cada variável produtiva avaliada, SAFRA corresponde ao efeito dos anos agrícolas, REP representa o efeito dos blocos experimentais,  $\text{CP}_n$  representa os componentes principais retidos pela análise dos componentes principais e  $\varepsilon$  representa o erro aleatório.

Para cada modelo foram estimados os coeficientes de regressão, os níveis de significância, o coeficiente de determinação, o coeficiente de determinação ajustado e a contribuição relativa de cada termo para o coeficiente de determinação total do modelo. Essa abordagem permitiu quantificar a importância dos diferentes componentes principais na variabilidade das características produtivas.

A interpretação biológica dos componentes principais foi baseada na análise dos coeficientes de "carga", que quantificam a contribuição e correlação de cada variável para um determinado componente principal. Ao focar nas variáveis com as maiores cargas absolutas, é possível identificar quais impulsionaram a variância capturada por cada componente principal, facilitando a interpretação em conjuntos de dados complexos (Maheshwari *et al.*, 2026). Essa abordagem orienta a compreensão dos padrões biológicos subjacentes e dos mecanismos representados nos componentes principais.

Para auxiliar a interpretação e visualização, foram construídos bigráficos bidimensionais. Esses biplots plotam simultaneamente as pontuações das amostras (por

exemplo, tratamentos) e as cargas de variáveis no espaço reduzido do componente principal. Essa dupla exibição permitiu avaliar associações entre variáveis e os tratamentos, fornecendo uma visão intuitiva de como os tratamentos se diferem em relação às principais características capturadas pelos componentes principais (Maheshwari *et al.*, 2026).

Quanto à avaliação de modelos de regressão usados em conjunto com análise dos componentes principais ou modelagem preditiva de componentes principais, a adequação foi avaliada criticamente, por meio da análise gráfica dos resíduos, teste de Normalidade de Shapiro-Wilk, homogeneidade das variâncias e fator de inflação da variância. Juntos, esses procedimentos garantem que os modelos de regressão representem adequadamente as relações entre os componentes principais e os tratamentos, validando inferências estatísticas (Gloi e Buchanan, 2013).

Todas as análises foram desenvolvidas no ambiente estatístico R, com uso do pacote MVar.pt para análise de componentes principais adaptadas aos dados multivariados. Com isto, tem-se melhor interpretação dos cálculos da análise dos componentes principais, incluindo a extração de carregamentos, pontuações, criação de biplots e integração com diagnósticos de regressão (Maheshwari *et al.*, 2026).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Análise de componentes principais e gradientes multivariados do sistema

A análise de componentes principais resultou na formação de 12 componentes com autovalores superiores a 1 (critério de Kaiser), os quais explicaram conjuntamente 86,9% da variância total dos dados (Tabela 2). Os dois primeiros componentes concentraram 50,26% da variabilidade total, sendo 36,41% atribuídos ao primeiro e 13,85% ao segundo. Isto representa os principais gradientes multivariados do sistema, definindo o principal espaço interpretativo da ordenação multivariada. Os componentes de três a cinco explicaram conjuntamente 20,78% adicionais da variabilidade, enquanto os componentes de seis a doze contribuíram individualmente com variações entre 1,47 e 3,58%, elevando a variância acumulada para 86,9%.

Considerando que a análise foi conduzida com 73 variáveis explicativas, a análise de componentes principais permitiu representar a estrutura multivariada original por doze componentes latentes ortogonais entre si. Consequentemente, houve uma sintetização da maior parte das informações geradas pelas características avaliadas no sorgo, reduzindo substancialmente sua complexidade dimensional.

O primeiro componente principal foi definido como um gradiente de partição entre crescimento vegetativo e mobilização de nutrientes para grãos. Este foi estruturado pelo contraste entre elevadas cargas negativas associadas aos teores de potássio (Kg: -0,96), fósforo (Pg: -0,95) e zinco nos grãos (Zng: -0,94), acúmulo nos grãos de potássio (Kacg: -0,94) e zinco (Znacg: -0,94), teor de magnésio nos grãos (Mgg: -0,92) e fósforo (Pacg: -0,91) e magnésio acumulado nos grãos (Mgacg: -0,89) (Tabela 3). Por outro lado, elevadas cargas positivas foram associadas ao diâmetro do colmo (DC: 0,90), teores de zinco foliar (Znf: 0,89) e altura de plantas (AP: 0,87). É importante ressaltar que esse componente representou o principal eixo de variação do sistema, evidenciando oposição entre investimento em crescimento vegetativo e mobilização de nutrientes para estruturas reprodutivas.

O segundo componente foi definido como um gradiente de balanço mineral na planta, tendo como principais variáveis estruturantes os teores de manganês (Mnp: -0,84), cálcio (Cap: -0,74), ferro (Fep: -0,74), zinco (Znp: -0,71) e nitrogênio na planta (Np: 0,73) (Tabela 2). Isto reflete em padrões integrados de distribuição e equilíbrio mineral nas plantas de sorgo. O terceiro componente representou um gradiente de biomassa seca e acúmulo de nutrientes na

parte aérea, sendo definido principalmente pela massa seca (PMS: -0,83), acúmulo de enxofre (Sapc: -0,76) e de nitrogênio na parte aérea da planta (Nacp: -0,63) e teor foliar de manganês (Mnf: -0,58). Estes resultados representam variações relacionadas à formação de biomassa e ao acúmulo de nutrientes na parte aérea.

O quarto componente foi caracterizado como um gradiente de desempenho fotoquímico e dissipação energética. Este foi estruturado principalmente pelo acúmulo de cobre (Cuacg: -0,55) e de boro nos grãos (Bacg: -0,52), além da dissipação (Dio/RC: -0,50) e absorção de energia por centro de reação (ABS/RC: -0,49), teor de boro nos grãos (Bg: -0,47) e do índice de performance de absorção (PiAbs: 0,46). O quinto componente representou um gradiente de eficiência fotoquímica na clorofila, caracterizado pelo antagonismo entre a eficiência do fotossistema II (PhiPo: 0,72) e da dissipação de energia (PhiDo: -0,71), dissipação de energia por centro de reação (Dio/RC: -0,59) e pelo índice de performance de absorção (PiAbs: 0,52). Neste componente, foi possível constatar uma associação ao equilíbrio entre a eficiência fotoquímica e a dissipação de energia pelas plantas de sorgo.

O sexto componente esteve associado a um gradiente de pigmentos fotossintéticos, composto pelas maiores cargas dos índices de clorofila total (CHRT: 0,55), clorofila *b* (0,52) e clorofila *a* (0,48) (Tabela 2). Semelhantemente, o sétimo componente foi associado a um gradiente dos índices de clorofila, tendo como principais variáveis estruturantes a razão de clorofila *a* e *b* (Chla/Chlb) (-0,44) e clorofila *b* (Chlb: 0,40), tendo relações associadas à composição dos pigmentos fotossintéticos nas plantas de sorgo.

O oitavo componente representou um gradiente nutricional nas folhas, definido principalmente pelo acúmulo de nitrogênio nos grãos (Nacg: -0,39), e pelos teores foliares de potássio (Kf: 0,42), manganês (Mnf: 0,42) e cobre (Cuf: 0,35) (Tabela 3). O nono componente representou um gradiente secundário de variação morfológica e nutricional, tendo como principal contribuição o acúmulo de nitrogênio nos grãos (Nacg: -0,36), comprimento da panícula (CP: -0,34), teores de nitrogênio foliar (Nf: -0,32) e nos grãos (Ng: -0,32), acúmulo de enxofre nos grãos (Sag: -0,32) e teor de boro foliar (Bf: 0,30).

O décimo componente foi associado a um gradiente de estrutura populacional e composição nutricional dos grãos. Neste, as principais variáveis estruturantes foram o acamamento (ACAM: -0,38), teor de ferro foliar (Fef: -0,28), teor de zinco na planta (Znp: -0,27), teor foliar de manganês (Mnf: -0,26), zinco acumulado na planta (Znacp: -0,25), teores de boro (Bg: 0,33) e de enxofre nos grãos (Sg: 0,31) e da população de plantas (POP: 0,28) (Tabela 2). O décimo primeiro componente foi estruturado principalmente pela população de plantas (POP: -0,56) e teor de enxofre na planta (Sp: 0,40). O décimo segundo componente

representou um gradiente residual de variação estrutural, tendo como principal contribuição o teor foliar de enxofre (Sf: -0,31), o acamamento (ACAM: 0,38) associado ao teor de enxofre nos grãos (Sg: 0,34).

Dessa forma, a Análise de Componentes Principais (PCA) permitiu condensar um conjunto altamente multidimensional em 12 gradientes biológicos interpretáveis, sintetizando 73 variáveis originais em componentes latentes associados à partição de nutrientes, balanço mineral, eficiência fotoquímica, dinâmica populacional e estrutura das plantas, evidenciando forte integração entre processos fisiológicos, nutricionais e agronômicos que estruturaram a variabilidade observada no sistema.

Com base no critério de cargas absolutas maiores ou iguais a 0,40, apenas as variáveis comprimento da panícula, população de plantas, acamamento, teores foliares de nitrogênio, enxofre, ferro, manganês, cobre e boro, teores nos grãos de nitrogênio, enxofre e boro, acúmulo nos grãos de nitrogênio e enxofre, teor e acúmulo de zinco na planta não apresentaram associação relevante com nenhum dos componentes retidos.

TABELA 3 - Correlações entre as variáveis fisiológicas, nutricionais e agronômicas e os componentes principais (CP1–CP12) com autovalores, variância explicada e variância acumulada da análise de componentes principais (PCA) do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada, em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024

| Variáveis | CP1   | CP2   | CP3   | CP4   | CP5   | CP6   | CP7   | CP8   | CP9   | CP10  | CP11  | CP12  |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Chla      | 0,21  | -0,57 | -0,29 | -0,24 | 0,10  | 0,48  | 0,12  | 0,11  | 0,01  | 0,06  | 0,01  | -0,21 |
| Chlb      | -0,19 | -0,30 | -0,55 | -0,14 | -0,09 | 0,52  | 0,40  | 0,20  | 0,01  | 0,11  | 0,01  | 0,09  |
| Chlt      | 0,03  | -0,50 | -0,45 | -0,22 | 0,02  | 0,55  | 0,27  | 0,17  | 0,01  | 0,09  | 0,01  | -0,09 |
| Chla/Chlb | 0,42  | -0,07 | 0,49  | -0,03 | 0,16  | -0,28 | -0,44 | -0,13 | 0,01  | -0,09 | 0,00  | -0,25 |
| PhiPo     | -0,24 | -0,08 | -0,36 | 0,41  | 0,72  | -0,15 | -0,02 | 0,15  | -0,04 | 0,07  | 0,07  | 0,05  |
| PhiEo     | -0,44 | 0,01  | -0,31 | 0,40  | 0,50  | -0,12 | 0,07  | -0,05 | 0,07  | -0,15 | -0,12 | -0,02 |
| PhiDo     | 0,21  | 0,09  | 0,38  | -0,42 | -0,71 | 0,15  | 0,01  | -0,15 | 0,05  | -0,07 | -0,08 | -0,04 |
| PiAbs     | -0,59 | 0,01  | -0,23 | 0,46  | 0,52  | -0,08 | 0,07  | 0,03  | 0,03  | -0,09 | 0,00  | 0,01  |
| ABS/RC    | 0,70  | 0,04  | 0,12  | -0,49 | -0,40 | 0,06  | -0,06 | -0,08 | 0,03  | -0,07 | -0,02 | -0,02 |
| Dio/RC    | 0,50  | 0,07  | 0,24  | -0,50 | -0,59 | 0,11  | -0,02 | -0,13 | 0,04  | -0,10 | -0,02 | -0,02 |
| POP       | 0,12  | -0,03 | -0,38 | 0,09  | 0,04  | -0,26 | -0,16 | -0,13 | -0,02 | 0,28  | -0,56 | -0,20 |
| PMV       | 0,69  | 0,00  | -0,49 | -0,24 | 0,00  | -0,12 | -0,27 | 0,02  | 0,12  | 0,05  | -0,06 | -0,03 |
| PMS       | -0,01 | 0,10  | -0,83 | -0,09 | -0,19 | -0,09 | -0,38 | -0,12 | 0,15  | 0,02  | -0,12 | 0,14  |
| AP        | 0,87  | 0,00  | -0,24 | -0,16 | 0,10  | 0,10  | 0,03  | 0,03  | -0,02 | 0,00  | 0,00  | -0,12 |
| CP        | 0,00  | 0,34  | -0,3  | 0,01  | -0,30 | 0,16  | 0,11  | -0,14 | -0,34 | 0,11  | -0,07 | -0,18 |
| DC        | 0,90  | -0,15 | -0,17 | -0,28 | 0,10  | -0,03 | 0,00  | 0,08  | 0,03  | -0,07 | 0,03  | -0,04 |
| POP       | 0,49  | -0,16 | -0,05 | -0,29 | 0,38  | 0,02  | -0,06 | -0,11 | 0,02  | -0,04 | 0,23  | -0,29 |
| ACAM      | -0,38 | 0,14  | -0,10 | 0,25  | -0,25 | 0,04  | 0,31  | -0,10 | 0,19  | -0,38 | -0,14 | 0,38  |
| Nf        | -0,57 | 0,37  | -0,08 | 0,24  | -0,25 | -0,05 | -0,07 | 0,31  | -0,32 | 0,12  | 0,00  | -0,14 |

Cont. Tab. 3

|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pf    | -0,76 | 0,32  | -0,10 | 0,33  | -0,26 | 0,07  | 0,02  | 0,16  | -0,07 | 0,09  | 0,00  | -0,11 |
| Kf    | 0,68  | 0,13  | -0,21 | -0,19 | -0,07 | -0,02 | -0,11 | 0,42  | 0,04  | -0,05 | 0,05  | -0,03 |
| Caf   | -0,62 | 0,37  | 0,05  | 0,33  | -0,25 | -0,06 | 0,17  | -0,09 | 0,11  | 0,10  | -0,15 | -0,21 |
| Mgf   | -0,57 | 0,42  | 0,07  | 0,32  | -0,28 | -0,15 | 0,17  | -0,15 | 0,09  | -0,01 | -0,05 | -0,17 |
| Sf    | 0,10  | 0,61  | -0,06 | 0,24  | -0,34 | -0,23 | -0,06 | 0,28  | -0,10 | -0,03 | 0,05  | -0,31 |
| Fef   | 0,48  | -0,13 | -0,16 | 0,08  | -0,05 | -0,33 | 0,37  | 0,18  | 0,24  | -0,28 | -0,2  | -0,07 |
| Mnf   | 0,31  | 0,05  | -0,58 | 0,00  | -0,29 | -0,17 | 0,25  | 0,42  | 0,01  | -0,26 | -0,11 | 0,01  |
| Cuf   | -0,07 | 0,48  | -0,16 | 0,23  | -0,43 | -0,34 | 0,13  | 0,35  | -0,09 | -0,11 | 0,11  | -0,08 |
| Znf   | 0,89  | 0,04  | -0,17 | -0,18 | -0,02 | -0,19 | 0,09  | 0,13  | 0,10  | -0,11 | 0,04  | -0,09 |
| Bf    | -0,64 | 0,25  | 0,13  | 0,40  | -0,15 | -0,06 | 0,24  | 0,00  | 0,30  | 0,03  | -0,05 | 0,01  |
| Ng    | 0,36  | 0,00  | 0,01  | -0,17 | 0,04  | -0,37 | 0,09  | 0,20  | -0,32 | 0,12  | -0,04 | 0,07  |
| Pg    | -0,95 | 0,12  | 0,02  | -0,11 | 0,04  | 0,06  | -0,04 | 0,08  | -0,03 | -0,06 | -0,05 | 0,00  |
| Kg    | -0,96 | 0,07  | 0,10  | -0,14 | 0,05  | 0,05  | -0,07 | 0,06  | 0,01  | -0,08 | -0,04 | 0,02  |
| Cag   | -0,78 | 0,25  | 0,20  | -0,39 | 0,09  | -0,09 | -0,02 | 0,15  | 0,18  | 0,04  | -0,03 | 0,03  |
| Mgg   | -0,92 | 0,06  | 0,06  | -0,23 | 0,07  | 0,04  | -0,07 | 0,11  | -0,01 | -0,08 | -0,06 | 0,00  |
| Sg    | -0,04 | 0,58  | 0,07  | -0,19 | -0,07 | -0,27 | 0,20  | -0,02 | -0,20 | 0,31  | 0,19  | 0,34  |
| Feg   | -0,83 | 0,1   | 0,17  | -0,38 | 0,11  | 0,00  | -0,07 | 0,17  | 0,06  | -0,01 | -0,06 | -0,01 |
| Mng   | -0,86 | 0,06  | 0,02  | -0,39 | 0,10  | 0,05  | -0,07 | 0,17  | 0,07  | -0,06 | -0,08 | -0,02 |
| Cug   | -0,72 | 0,09  | 0,25  | -0,47 | 0,07  | -0,12 | -0,06 | 0,20  | 0,08  | 0,01  | -0,06 | -0,04 |
| Zng   | -0,94 | 0,11  | 0,17  | -0,14 | 0,02  | -0,01 | -0,08 | 0,09  | 0,00  | 0,00  | -0,02 | -0,02 |
| Bg    | -0,36 | 0,45  | 0,03  | -0,47 | 0,02  | -0,26 | 0,14  | 0,09  | 0,29  | 0,33  | 0,14  | 0,08  |
| Nacg  | 0,12  | 0,11  | -0,51 | -0,27 | 0,18  | -0,12 | 0,35  | -0,39 | -0,36 | -0,18 | -0,07 | -0,12 |
| Pacg  | -0,91 | 0,12  | -0,17 | -0,17 | 0,10  | 0,07  | 0,02  | -0,06 | -0,11 | -0,11 | -0,04 | -0,05 |
| Kacg  | -0,94 | 0,07  | -0,06 | -0,18 | 0,09  | 0,06  | -0,03 | -0,06 | -0,06 | -0,12 | -0,03 | -0,03 |
| Caacg | -0,79 | 0,28  | 0,03  | -0,44 | 0,13  | -0,08 | 0,05  | 0,01  | 0,10  | -0,01 | -0,02 | -0,01 |
| Mgacg | -0,89 | 0,06  | -0,14 | -0,28 | 0,13  | 0,05  | 0,00  | -0,03 | -0,10 | -0,14 | -0,05 | -0,05 |
| Sacg  | -0,03 | 0,51  | -0,36 | -0,28 | 0,04  | -0,22 | 0,34  | -0,37 | -0,32 | 0,04  | 0,10  | 0,14  |
| Feacg | -0,84 | 0,10  | 0,04  | -0,41 | 0,15  | 0,01  | -0,03 | 0,08  | 0,01  | -0,04 | -0,04 | -0,05 |
| Mnacg | -0,81 | 0,06  | -0,20 | -0,43 | 0,16  | 0,06  | 0,02  | -0,01 | -0,04 | -0,13 | -0,07 | -0,07 |
| Cuacg | -0,75 | 0,12  | 0,03  | -0,55 | 0,13  | -0,11 | 0,04  | 0,04  | -0,03 | -0,07 | -0,06 | -0,10 |
| Znacg | -0,94 | 0,12  | -0,01 | -0,19 | 0,07  | 0,00  | -0,03 | -0,04 | -0,09 | -0,06 | -0,01 | -0,06 |
| Bacg  | -0,33 | 0,46  | -0,17 | -0,52 | 0,06  | -0,23 | 0,21  | -0,09 | 0,20  | 0,26  | 0,12  | 0,04  |
| Np    | 0,23  | 0,73  | -0,20 | -0,03 | 0,09  | 0,07  | -0,07 | 0,15  | -0,19 | 0,06  | 0,12  | -0,04 |
| Pp    | -0,83 | 0,24  | -0,10 | 0,24  | -0,07 | 0,22  | -0,06 | -0,02 | 0,01  | -0,04 | 0,20  | -0,06 |
| Kp    | -0,75 | -0,39 | 0,11  | 0,20  | -0,21 | 0,13  | -0,10 | 0,08  | -0,08 | 0,15  | 0,04  | 0,01  |
| Cap   | -0,39 | -0,74 | 0,16  | -0,12 | -0,08 | -0,19 | 0,16  | -0,08 | -0,19 | 0,00  | -0,05 | -0,07 |
| Mgp   | -0,82 | -0,29 | 0,20  | 0,09  | -0,12 | -0,06 | 0,11  | -0,18 | -0,10 | -0,09 | 0,03  | -0,08 |
| Sp    | 0,01  | 0,52  | -0,21 | 0,04  | 0,02  | 0,10  | 0,17  | -0,20 | 0,25  | -0,16 | 0,40  | -0,29 |
| Fep   | -0,27 | -0,74 | 0,04  | 0,00  | -0,01 | -0,29 | 0,25  | -0,06 | 0,13  | 0,20  | 0,14  | -0,17 |
| Mnp   | -0,22 | -0,84 | -0,04 | -0,09 | -0,09 | 0,02  | 0,13  | 0,16  | -0,11 | 0,07  | 0,06  | -0,01 |
| Cup   | -0,89 | -0,11 | 0,12  | 0,25  | -0,18 | 0,06  | -0,04 | 0,01  | -0,08 | -0,02 | 0,18  | 0,00  |
| Znp   | -0,12 | -0,71 | 0,24  | -0,08 | -0,06 | -0,33 | -0,01 | 0,12  | -0,17 | -0,27 | 0,30  | 0,03  |
| Bp    | -0,55 | -0,61 | 0,03  | 0,13  | -0,14 | -0,15 | 0,20  | 0,00  | 0,12  | 0,11  | 0,05  | -0,10 |
| Nacp  | 0,17  | 0,58  | -0,63 | -0,08 | -0,04 | -0,02 | -0,27 | 0,05  | -0,05 | 0,03  | 0,01  | 0,07  |
| Pacp  | -0,75 | 0,25  | -0,39 | 0,17  | -0,12 | 0,16  | -0,2  | -0,07 | 0,06  | -0,02 | 0,15  | -0,01 |
| Kacp  | -0,72 | -0,35 | -0,25 | 0,15  | -0,27 | 0,08  | -0,27 | 0,02  | -0,01 | 0,14  | 0,00  | 0,07  |

Cont. Tab. 3

|                |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Caacp          | -0,40 | -0,69 | -0,28 | -0,16 | -0,19 | -0,22 | -0,07 | -0,13 | -0,11 | 0,00  | -0,09 | 0,01  |
| Mgacp          | -0,81 | -0,24 | -0,24 | 0,04  | -0,21 | -0,09 | -0,12 | -0,24 | -0,03 | -0,08 | 0,00  | 0,02  |
| Sacp           | 0,03  | 0,40  | -0,76 | -0,05 | -0,12 | -0,01 | -0,19 | -0,21 | 0,24  | -0,06 | 0,16  | -0,04 |
| Feacp          | -0,27 | -0,68 | -0,36 | -0,06 | -0,11 | -0,32 | 0,04  | -0,11 | 0,19  | 0,20  | 0,10  | -0,09 |
| Mnacp          | -0,21 | -0,70 | -0,51 | -0,14 | -0,2  | -0,03 | -0,12 | 0,08  | -0,01 | 0,06  | 0,01  | 0,09  |
| Cuacp          | -0,85 | -0,08 | -0,24 | 0,19  | -0,23 | 0,02  | -0,22 | -0,05 | -0,02 | -0,02 | 0,13  | 0,06  |
| Znacp          | -0,14 | -0,61 | -0,37 | -0,14 | -0,19 | -0,35 | -0,28 | 0,05  | -0,06 | -0,25 | 0,21  | 0,13  |
| Bacp           | -0,54 | -0,58 | -0,26 | 0,09  | -0,21 | -0,17 | 0,04  | -0,03 | 0,15  | 0,11  | 0,01  | -0,05 |
| Autovalor      | 26,58 | 10,11 | 6,03  | 5,29  | 3,85  | 2,62  | 2,14  | 1,82  | 1,47  | 1,31  | 1,16  | 1,07  |
| Variância (%)  | 36,41 | 13,85 | 8,25  | 7,25  | 5,28  | 3,58  | 2,94  | 2,49  | 2,01  | 1,79  | 1,59  | 1,47  |
| Var. acum. (%) | 36,41 | 50,26 | 58,51 | 65,76 | 71,04 | 74,62 | 77,56 | 80,04 | 82,05 | 83,85 | 85,44 | 86,9  |

Chla = clorofila a; Chlb = clorofila b; Chlt = clorofila total; Chla/Chlb = razão entre clorofilas a e b; PhiPo = rendimento quântico máximo do fotossistema II (Fv/Fm); PhiEo = rendimento quântico de transporte de elétrons; PhiDo = rendimento quântico de dissipação de energia; PiAbs = índice de desempenho fotoquímico (performance index); ABS/RC = fluxo de absorção de energia por centro de reação; Dio/RC = dissipação de energia por centro de reação; POP = população de plantas; PMV = peso de massa verde; PMS = peso de massa seca; AP = altura de plantas; CP = comprimento de panícula; DC = diâmetro de colmo; ACAM = acamamento; Nf, Pf, Kf, Caf, Mgf, Sf, Fef, Mnf, Cuf, Znf, Bf = teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn e B na folha; Ng, Pg, Kg, Cag, Mgg, Sg, Feg, Mng, Cug, Zng, Bg = teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn e B no grão; Np, Pp, Kp, Cap, Mgp, Sp, Fep, Mnp, Cup, Znp, Bp = teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn e B na palha; Nacg, Pacg, Kacg, Caacg, Mgacg, Sacg, Feacg, Mnacg, Cuacg, Znacg, Bacg = acúmulo de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn e B no grão; Nacp, Pacp, Kacp, Caacp, Mgacp, Sacp, Feacp, Mnacp, Cuacp, Znacp, Bacp = acúmulo de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn e B na palha; CP1–CP12 = componentes principais 1 a 12.

## 4.2 Efeitos dos fatores experimentais sobre os escores dos componentes principais e variáveis produtivas

As respostas aos efeitos dos fatores experimentais e de suas interações sobre os escores dos componentes principais variaram entre os gradientes fisiológicos, nutricionais e agrônômicos (Tabela 3). Dos doze componentes retidos, sete (CP1, CP3, CP4, CP5, CP6, CP8 e CP10) apresentaram efeito significativo em pelo menos um fator geral ou para a interação. Isto representa que as respostas dos tratamentos se manifestaram em componentes associados a processos fisiológicos, nutricionais e agrônômicos do sorgo. Já os CP2, CP7, CP9, CP11 e CP12 não apresentaram efeitos significativos para os fatores avaliados.

Entre as interações de primeira ordem, observou-se efeito significativo de Fertilizante  $\times$  Safra em CP1, CP4 e CP10 (Tabela 3). Desta forma, a resposta dos fertilizantes utilizados na semeadura do sorgo foi dependente das condições entre os anos agrícolas em gradientes associados à partição entre crescimento vegetativo e mobilização de nutrientes para grãos (CP1), ao desempenho fotoquímico e à dissipação energética (CP4), e à população de plantas e a composição mineral dos grãos (CP10). A interação N  $\times$  SAFRA foi significativa para os CP3 e CP6, evidenciando modulação temporal da resposta do sorgo à adubação nitrogenada em cobertura nos componentes associados ao acúmulo de biomassa e de nutrientes (CP3), bem como

à constituição dos pigmentos fotossintéticos (CP6). A interação Fertilizante x Safra foi significativa em CP5, indicando efeito conjunto das fontes de fertilizantes e do nitrogênio em cobertura no gradiente de eficiência fotoquímica.

Entre os efeitos principais, o fator Safra apresentou efeito significativo para os CP1 e CP4, reforçando a influência temporal sobre componentes associados à partição de nutrientes e ao desempenho fotoquímico. Já o fator N apresentou efeito significativo para os CP6, CP8 e CP10. Por fim, o fator Fertilizante apresentou efeito significativo para os CP3 e CP8, evidenciando influência sobre componentes relacionados ao acúmulo de nutrientes na planta e ao conteúdo foliar.

Em relação às variáveis produtivas, produtividade de grãos, número de grãos por planta, peso de mil grãos e índice de colheita apresentaram pelo menos um efeito significativo para fatores principais ou para as interações (Tabela 4). Para produtividade de grãos e número de grãos por panícula, observou-se efeito significativo de Fertilizante x Safra, indicando resposta dependente das condições climáticas em função dos fertilizantes utilizados na semeadura. O peso de mil grãos foi influenciado significativamente pela interação tripla Fertilizante x Nitrogênio x Safra, indicando dependência conjunta dos três fatores na modulação desse componente do rendimento. Já a variável índice de colheita foi influenciada pela interação Nitrogênio × Safra, evidenciando modulação temporal da eficiência da alocação de biomassa para os grãos, em função da adubação nitrogenada em cobertura.

Quanto aos efeitos principais, a produtividade e o peso de mil grãos foram influenciados significativamente pelo fator Nitrogênio (Tabela 4). O tipo de fertilizante também exerceu efeito significativo sobre a produtividade, o número de grãos por panícula e o peso de mil grãos. Por fim, as variáveis número de grãos por panícula e peso de mil grãos responderam significativamente ao efeito de Safra.

TABELA 4 - Valores de p da ANOVA dos escores dos componentes principais (CP1–CP12) e das variáveis produtividade de grãos (PROD), número de grãos por panícula (NGP), peso de mil grãos (PMG) e índice de colheita (IC) em função do fertilizante na semeadura (F), nitrogênio em cobertura (N) e das safras (S) do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024

| Componente | Fertilizante (F)  | Nitrogênio (N) | Safrs (S)         | F x N         | F x S         | N x S         | F x N x S     |
|------------|-------------------|----------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| CP1        | 0,2838            | 0,6300         | <b>&lt;0,0001</b> | 0,8839        | <b>0,0109</b> | 0,2012        | 0,1987        |
| CP2        | 0,7356            | 0,7602         | 0,2300            | 0,9924        | 0,7907        | 0,9473        | 0,7383        |
| CP3        | <b>&lt;0,0001</b> | 0,7562         | 0,0576            | 0,3267        | 0,5672        | <b>0,0279</b> | 0,0678        |
| CP4        | 0,2585            | 0,8831         | <b>0,0026</b>     | 0,8371        | <b>0,0036</b> | 0,4246        | 0,4595        |
| CP5        | 0,4807            | 0,7960         | 0,3467            | <b>0,0314</b> | 0,2612        | 0,1159        | 0,6416        |
| CP6        | 0,0788            | <b>0,0193</b>  | 0,4870            | 0,3984        | 0,8813        | <b>0,0054</b> | 0,1068        |
| CP7        | 0,1816            | 0,2976         | 0,9920            | 0,9804        | 0,1543        | 0,6980        | 0,1649        |
| CP8        | <b>0,0365</b>     | <b>0,0255</b>  | 0,6120            | 0,2555        | 0,3488        | 0,2261        | 0,0726        |
| CP9        | <b>0,0530</b>     | 0,0605         | 0,5949            | 0,4772        | 0,2186        | 0,6976        | 0,0682        |
| CP10       | 0,3984            | <b>0,0027</b>  | 0,4691            | 0,1800        | <b>0,0301</b> | 0,4423        | 0,2075        |
| CP11       | 0,6426            | 0,1375         | 0,7057            | 0,8747        | 0,6896        | 0,1870        | 0,7674        |
| CP12       | 0,5339            | 0,1804         | 0,8560            | 0,9925        | 0,9740        | 0,6966        | 0,5878        |
| PROD       | <b>&lt;0,0001</b> | <b>0,0326</b>  | 0,2035            | 0,4128        | <b>0,0020</b> | 0,6574        | 0,1398        |
| NGP        | <b>0,0444</b>     | 0,1793         | <b>&lt;0,0001</b> | 0,1168        | <b>0,0001</b> | 0,5349        | 0,5554        |
| PMG        | <b>0,0139</b>     | <b>0,0347</b>  | <b>0,0030</b>     | 0,7352        | 0,4199        | 0,7752        | <b>0,0397</b> |
| IC         | 0,1778            | 0,1211         | 0,8787            | 0,9721        | 0,1017        | <b>0,0125</b> | 0,3645        |

Valores de p da ANOVA. F: fertilizante na semeadura; N: nitrogênio em cobertura; S: safras (2023 e 2024); CP1–CP12: componentes principais 1 a 12; PROD: produtividade de grãos; NGP: número de grãos por panícula; PMG: peso de mil grãos; IC: índice de colheita; F x N, F x S, N x S e F x N x S: interações entre os fatores. Valores em negrito indicam efeito significativo pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

O desdobramento da interação significativa entre fertilizante e safra para CP1, CP4 e CP10 evidenciou que a resposta dos tratamentos foi dependente do gradiente representado por cada componente e modulada pelas condições entre as safras (Tabela 5). Para CP1, associado ao gradiente de partição entre crescimento vegetativo e mobilização de nutrientes para grãos, não houve diferenciação entre fertilizantes na safra 2023, indicando relativa uniformidade dos tratamentos nesse componente. Entretanto, em 2024 ocorreu diferenciação entre as fontes de fertilizantes. Neste caso, a Ureia na semeadura teve o menor escore e o tratamento Controle o maior, enquanto os demais fertilizantes apresentaram comportamento intermediário.

Para CP4, associado ao gradiente de desempenho fotoquímico e dissipação de energia, também não houve diferenças entre fertilizantes em 2023 (Tabela 5). Já na safra 2024, observou-se diferenciação dos tratamentos, com o Super Simples, Fosfato Monoamônio + Ureia e o S15 com maiores escores em relação à Ureia.

Para CP10, relacionado à estrutura populacional e a composição mineral dos grãos, não foram observadas diferenças entre fertilizantes em cada safra, indicando baixa discriminação

dos tratamentos nesse gradiente. A produtividade de grãos do sorgo granífero foi afetada pela interação entre fertilizante e safra (Tabela 5), evidenciando resposta agrônômica consistente com os padrões identificados para os componentes principais. Na safra 2023, os fertilizantes Fosfato Monoamônio + Ureia, S15 e Super Simples proporcionaram maiores produtividades em relação ao Controle. No entanto, em 2024, não houve efeito dos fertilizantes para a variável em questão. Na comparação entre safras, verificou-se maior produtividade de grãos para o Controle em 2024, enquanto Fosfato Monoamônio + Ureia e Super Simples apresentaram redução, evidenciando resposta dependente do ambiente. Esses resultados corroboram que a eficiência produtiva dos fertilizantes foi condicionada pelas condições entre safras e acompanhou parcialmente a modulação temporal observada nos gradientes multivariados.

Comportamento semelhante observou-se para o número de grãos por panícula, com diferenciação entre fertilizantes apenas em 2023 (Tabela 5). Nesta safra, Fosfato Monoamônio + Ureia, S15, Super Simples e Super Triplo apresentaram maiores valores, em relação ao Controle. Em 2024, não houve efeito dos fertilizantes. Na comparação entre safras, verificou-se incremento no número de grãos por planta para Controle, Super Triplo e Ureia em 2024.

TABELA 5 - Médias ajustadas e desdobramento da interação significativa entre fertilizante e safra nos escores dos componentes principais CP1, CP4 e CP10, e nas variáveis produtividade de grãos (PROD) e número de grãos por panícula (NGP) do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024

| Fertilizantes | --- CP1 --- |                 | --- CP4 --- |                 | --- CP10 --- |         |
|---------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|--------------|---------|
|               | 2023        | 2024            | 2023        | 2024            | 2023         | 2024    |
| Controle      | 5,25 A      | <b>-3,55 bB</b> | 0,073       | 0,507 ab        | 0,696        | -0,179  |
| MAP+Ureia     | 4,05 A      | -4,43 abB       | -1,022 A    | 1,583 bB        | -0,755 A     | 0,497 B |
| S15           | 3,68 A      | -3,81 abB       | -1,996 A    | 1,520 bB        | 0,407        | -0,279  |
| Super simples | 4,81 A      | -4,06 abB       | -0,545 A    | 1,985 bB        | -0,727       | -0,193  |
| Super triplo  | 4,61 A      | -5,77 abB       | -0,337      | 0,181 ab        | 0,141        | 0,157   |
| Ureia         | 5,73 A      | -6,51 aB        | -0,024      | <b>-1,925 a</b> | -0,213       | 0,449   |

| Fertilizantes | --- PROD ---    |         | --- NGP ---    |         |
|---------------|-----------------|---------|----------------|---------|
|               | 2023            | 2024    | 2023           | 2024    |
| Controle      | <b>2.867 aA</b> | 3.351 B | <b>764 aA</b>  | 1.150 B |
| MAP+Ureia     | 3.971 cB        | 3.408 A | 1.080 b        | 1.046   |
| S15           | 4.076 c         | 3.764   | 1.073 b        | 1.158   |
| Super simples | 4.090 cB        | 3.531 A | 1.059 b        | 1.060   |
| Super triplo  | 3.745 bc        | 3.719   | 967 bA         | 1.183 B |
| Ureia         | 3.120 ab        | 3.422   | <b>884 abA</b> | 1.205 B |

Médias seguidas por letras minúsculas distintas na coluna diferem entre fertilizantes dentro de cada safra, e médias seguidas por letras maiúsculas distintas na linha diferem entre safras dentro de cada fertilizante, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

O desdobramento da interação significativa entre Nitrogênio e Safra para CP3 e CP6 como também para o índice de colheita, evidenciou respostas dependentes do gradiente representado por cada componente e moduladas pelas condições climáticas entre safras (Tabela 6).

Para CP3, associado ao gradiente de biomassa seca e acúmulo mineral nas folhas e na planta, não foram observadas diferenças entre presença e ausência de nitrogênio em cobertura para cada safra, indicando ausência de discriminação direta desse fator nesse componente em cada safra. Entretanto, entre as safras, observou-se diferença significativa quando se utilizou o nitrogênio em cobertura, com mudança de escores negativos para positivos de 2023 para 2024. Na ausência de nitrogênio, não houve variação temporal.

Para CP6, associado ao gradiente de pigmentos fotossintéticos na planta, observou-se que a ausência de nitrogênio em cobertura em 2023 proporcionou maiores escores, em relação à cobertura, sem efeitos para 2024 (Tabela 6). Para o índice de colheita, na safra de 2023, verificou-se maior escore na ausência de nitrogênio, em cobertura em comparação a sua presença, sem efeitos em 2024 (Tabela 6). Considerando que essa variável representa a eficiência de conversão da biomassa produzida em grãos, esse resultado sugere que a ausência de nitrogênio no sorgo favoreceu maior alocação de assimilados para os grãos em 2023. Entretanto, esse padrão não foi observado em 2024, evidenciando que a resposta do índice de colheita à adubação nitrogenada em cobertura foi dependente das condições ambientais prevalescentes nas safras.

Para os CP8 e CP10, observou-se efeito principal do nitrogênio em cobertura, com maiores escores na ausência da cobertura em relação a sua presença (Tabela 6). Considerando que o CP 8 esteve associado ao gradiente de conteúdo de nutrientes nas folhas, esse resultado sugere que a ausência de ureia esteve associada à maior expressão desse gradiente, indicando melhor estado nutricional para potássio, manganês e cobre. No CP10, associado à estrutura populacional e a composição mineral dos grãos, principalmente ao boro e enxofre, esse resultado sugere influência direta da adubação nitrogenada sobre esse gradiente. Contudo, como se trata de um componente de menor contribuição relativa para a variabilidade total, essa interpretação deve ser considerada com cautela.

Para a produtividade de grãos, em que também foi observado efeito principal do nitrogênio, verificaram-se maiores médias na ausência de nitrogênio em cobertura (Tabela 6). Este resultado indica influência direta da adubação nitrogenada no desempenho produtivo do sorgo, independentemente das respostas obtidas para CP3 e CP6. Sendo assim, em função dos resultados obtidos para os CP8 e CP10, a maior produtividade de grãos obtida na ausência de

nitrogênio em cobertura esteve relacionada a dinâmica de partição de assimilados e a mobilização para os grãos, como destacado anteriormente.

Em geral, a interação N em cobertura e Safra afetou principalmente gradientes associados à biomassa seca, ao acúmulo de nutrientes na parte aérea, aos pigmentos fotossintéticos e ao índice de colheita. Em se tratando sobre os efeitos diretos de ureia foram observados no conteúdo de nutrientes na folha, na composição mineral dos grãos e na produtividade, a resposta à adubação nitrogenada em cobertura, que envolveu efeitos integrados nos processos fisiológicos, nutricionais e produtivos da cultura do sorgo.

TABELA 6 - Médias ajustadas e desdobramento da interação significativa entre nitrogênio em cobertura e safras nos escores dos componentes principais CP3 e CP6 e para o índice de colheita (IC), e efeitos principais do nitrogênio em cobertura para CP8 e CP10 e para a produtividade de grãos (PROD) do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024

| N cobertura | --- CP3 --- |         | --- CP6 --- |         |
|-------------|-------------|---------|-------------|---------|
|             | 2023        | 2024    | 2023        | 2024    |
| Sem N       | 0.122       | -0.001  | 0.697 b     | 0.034   |
| Com N       | -0.874 A    | 0.753 B | -0.911 aA   | 0.180 B |

| N cobertura | --- IC --- |        | CP8      | CP10     | PROD   |
|-------------|------------|--------|----------|----------|--------|
|             | 2023       | 2024   |          |          |        |
| Sem N       | 0,3779 a   | 0,3483 | 0,283 b  | 0.321 b  | 3684 b |
| Com N       | 0,3329 b   | 0,3592 | -0,283 a | -0.321 a | 3493 a |

Médias seguidas por letras minúsculas distintas, na coluna, indicam diferenças entre níveis de ureia dentro de cada safra; médias seguidas por letras maiúsculas distintas, na linha, indicam diferenças entre safras dentro de cada nível de ureia; para CP8, CP10 e PROD, letras distintas indicam diferenças entre níveis de ureia pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ )

O desdobramento da interação significativa entre Fertilizante e N em cobertura para CP5, componente associado ao gradiente de eficiência fotoquímica, evidenciou ausência de diferenças entre as médias dos fertilizantes quando não se aplicou o nitrogênio em cobertura (Tabela 7). Isto evidencia relativa uniformidade dos tratamentos nesse componente na ausência de adubação nitrogenada. Entretanto, com a cobertura, o tratamento Controle foi o de maior escore e o S15 o de menor, enquanto os demais fertilizantes apresentaram comportamento intermediário.

Ainda na análise do CP5 e para cada fertilizante, diferença significativa foi observada apenas para o tratamento Controle, no qual a presença de nitrogênio em cobertura promoveu aumento dos escores em relação à condição sem cobertura (Tabela 7). Para os fertilizantes usados na semeadura Fosfato Monoamônio + Ureia, S15, Super Simples, Super Triplo e Ureia, não houve diferenças entre presença e ausência de nitrogênio em cobertura, indicando estabilidade desses

tratamentos em função desta prática cultural. Sendo assim, a modulação promovida pelo nitrogênio em cobertura ocorreu de forma mais pronunciada no tratamento Controle.

Para CP3, observou-se efeito principal de fertilizante, com o Controle tendo os maiores escores, diferindo de Fosfato Monoamônio + Ureia e S15, de menores valores (Tabela 7).

Para CP8, também observou-se efeito principal de fertilizante, com Ureia apresentando maiores escores em relação ao S15, enquanto os demais apresentaram comportamento intermediário (Tabela 7).

Em geral, os resultados obtidos dos CP3, CP5 e CP8 a partir da interação Fertilizante e Nitrogênio em cobertura, as características dos fertilizantes exerceram influência direta nos gradientes associados à biomassa seca, acúmulo de nutrientes na planta e folhas, reforçando a importância do manejo nutricional na modulação dos componentes integrados identificados pela PCA.

TABELA 7 - Médias ajustadas e desdobramento da interação significativa entre fertilizante e nitrogênio em cobertura nos escores do componente principal CP5 e de fertilizantes para CP3 e CP8 do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024

| Fertilizantes | CP5       |                  | CP3             | CP8              |
|---------------|-----------|------------------|-----------------|------------------|
|               | Sem N     | Com N            |                 |                  |
| Controle      | -1.2300 A | <b>1.7527 bB</b> | <b>2.344 c</b>  | 0.2865 ab        |
| MAP+Ureia     | -0.3068   | -0.8829 ab       | -1.110 a        | 0.0534 ab        |
| S15           | 0.0503    | -1.1730 a        | <b>-1.449 a</b> | <b>-0.6667 a</b> |
| Super simples | 0.4101    | 0.1731 ab        | -0.426 ab       | -0.0564 ab       |
| Super triplo  | 0.6896    | -0.1250 ab       | -0.608 ab       | -0.3398 ab       |
| Ureia         | 0.0878    | 0.5541 ab        | 1.249 bc        | <b>0.7230 b</b>  |

Médias seguidas por letras minúsculas distintas, na mesma coluna, diferem entre fertilizantes pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Para CP5, médias seguidas por letras maiúsculas distintas, na mesma linha, diferem entre níveis de nitrogênio dentro de cada fertilizante pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Para CP3 e CP8, as letras minúsculas referem-se aos efeitos principais de fertilizantes.

O componente da produtividade, peso de mil grãos, foi influenciado pela interação tripla entre fertilizante na semeadura, nitrogênio em cobertura e safra ( $p = 0,0397$ ). Na safra de 2023, não foram observadas diferenças significativas entre as combinações de fertilizante e aplicação de ureia, com valores variando de 22,4 a 24,6 g (Tabela 7), indicando comportamento semelhante entre os tratamentos. Por outro lado, em 2024, menores valores foram observados com os tratamentos Ureia na semeadura e Controle com uso do nitrogênio em cobertura (20,6 e 20,8 g, respectivamente). Já os maiores valores, na mesma safra, foram registrados para o S15

sem aplicação de nitrogênio em cobertura (24,5 g) e Super Simples com nitrogênio em cobertura (24,4 g), diferindo dos tratamentos com menores médias. Os demais tratamentos apresentaram comportamento intermediário.

Na comparação entre safras dentro de cada combinação de tratamento, diferença significativa foi observada apenas para o tratamento Ureia associado à aplicação de ureia em cobertura, cujo peso de mil grãos reduziu de 23,1 g em 2023 para 20,6 g em 2024 (Tabela 8).

TABELA 8 - Médias ajustadas e desdobramento da interação tripla significativa entre fertilizantes na semeadura, adubação nitrogenada em cobertura e safras para o peso de mil grãos do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024

| N em cobertura | Fertilizantes              | --- Safras --- |               |
|----------------|----------------------------|----------------|---------------|
|                |                            | 2023           | 2024          |
| Sem            | Controle                   | 23,8 a         | 21,6 abc      |
|                | Fosfato Monoamônio + Ureia | 24,6 a         | 23,4 abc      |
|                | S15                        | 22,8 a         | <b>24,5 c</b> |
|                | Super simples              | 24,4 a         | 22,4 abc      |
|                | Super triplo               | 24,5 a         | 22,6 abc      |
|                | Ureia                      | 22,5 Ba        | 21,6 Aabc     |
| Com            | Controle                   | 22,4 a         | 20,8 ab       |
|                | MAP+Ureia                  | 23,2 a         | 22,7 abc      |
|                | S15                        | 23,5 a         | 21,8 abc      |
|                | Super simples              | 22,9 a         | 24,4 bc       |
|                | Super triplo               | 22,9 a         | 22,5 abc      |
|                | Ureia                      | 23,1 a         | <b>20,6 a</b> |

Médias seguidas por letras minúsculas distintas na coluna diferem entre combinações de nitrogênio em cobertura e fertilizantes dentro de cada safra, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Médias seguidas por letras maiúsculas distintas na linha diferem entre safras dentro de cada combinação de fertilizante e nitrogênio em cobertura, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

#### 4.3 Correlação entre componentes e variáveis produtivas

Os componentes principais apresentaram correlações nulas ou próximas de zero entre si, confirmando a ortogonalidade dos componentes gerados pela PCA (Figura 2). Assim, cada componente descreveu uma fonte independente da variabilidade existente no conjunto de dados das variáveis analisadas. Correlações positivas significativas da produtividade de grãos (PROD) foram verificadas para número de grãos por panícula ( $r = 0,63$ ;  $p < 0,001$ ), índice de colheita ( $r = 0,64$ ;  $p < 0,001$ ), e peso de mil grãos ( $r = 0,43$ ;  $p < 0,001$ ) (Figura 2). O índice de colheita também

apresentou correlação positiva com número de grãos por planta ( $r = 0,39$ ;  $p < 0,001$ ) e peso de mil grãos ( $r = 0,27$ ;  $p = 0,0068$ ). Entre os componentes principais, o CP3 apresentou as associações mais expressivas com as variáveis produtivas. Neste caso, correlações negativas significativas foram constatadas com a produtividade de grãos ( $r = -0,64$ ;  $p < 0,001$ ), número de grãos por panícula ( $r = -0,33$ ;  $p = 0,0011$ ) e peso de mil grãos ( $r = -0,38$ ;  $p < 0,001$ ) (Figura 2).

Sobre o CP1, este apresentou correlação negativa moderada com o número de grãos por panícula ( $r = -0,50$ ;  $p < 0,001$ ) (Figura 2). Neste caso, o gradiente associado à partição entre o crescimento vegetativo e a mobilização de nutrientes para os grãos influenciou diretamente na formação de grãos por planta. Por outro lado, não foram observadas correlações significativas entre CP1 e a produtividade de grãos ou o índice de colheita.

O componente da produtividade peso de mil grãos apresentou correlação positiva com CP2 ( $r = 0,24$ ;  $p = 0,0189$ ) (Figura 2), demonstrando associação com o gradiente relacionado ao balanço mineral da planta. Em contraste, a correlação negativa com CP3 ( $r = -0,38$ ;  $p < 0,001$ ) reforçou a importância dos processos associados ao acúmulo de biomassa e nutrientes da planta na determinação do peso de mil grãos.

Para o índice de colheita, destacaram-se as correlações positivas com CP7 ( $r = 0,52$ ;  $p < 0,001$ ) e CP6 ( $r = 0,26$ ;  $p = 0,0115$ ), além da correlação negativa com CP12 ( $r = -0,30$ ;  $p = 0,0030$ ) e CP9 ( $r = -0,26$ ;  $p = 0,0030$ ) (Figura 2).

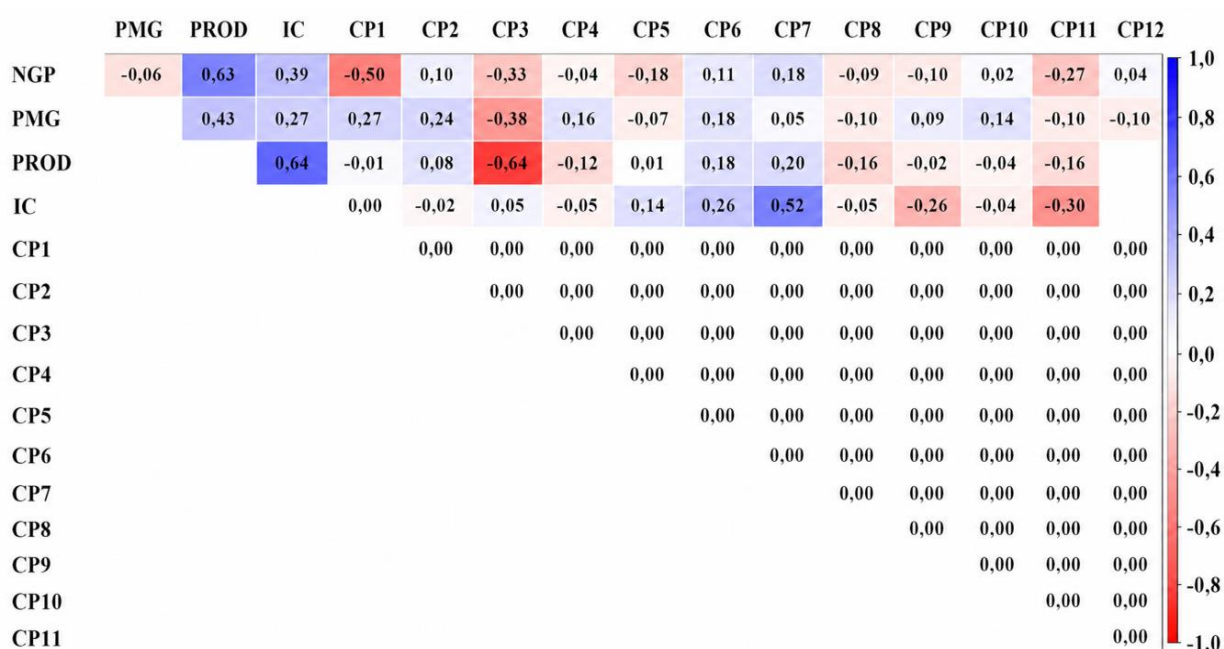


FIGURA 2 - Correlação entre as variáveis produtividade de grãos (PROD), número de grãos por panícula (NGP), peso de mil grãos (PMG) e índice de colheita (IC) e os doze componentes principais (CP) do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024.

As demais correlações entre os componentes principais (CP) e as variáveis de rendimento foram de baixa magnitude e não significativas ( $p > 0,05$ ) (Figura 2), indicando uma contribuição limitada desses gradientes na variação da produtividade.

#### 4.4 Capacidade preditiva dos componentes principais nas variáveis produtivas

Os modelos de regressão linear múltipla apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) variando entre 0,5075 e 0,5999 (Tabela 9). Isto indica que os componentes principais explicaram de 50,75% a 59,99% da variabilidade observada nas características produtivas avaliadas. A produtividade de grãos apresentou o maior ajuste do modelo ( $R^2 = 0,5999$ ), seguida pelo índice de colheita ( $R^2 = 0,5639$ ), número de grãos por planta ( $R^2 = 0,5514$ ) e peso de mil grãos ( $R^2 = 0,5075$ ).

Para a produtividade de grãos, o componente CP3 (produção de biomassa e acúmulo de nutrientes na parte aérea), exerceu o maior efeito entre todos os componentes avaliados, contribuindo significativamente para a redução da produtividade ( $\beta = -122,8423$ ;  $p \leq 0,001$ ). Em contrapartida, os componentes CP6 (gradiente de pigmentos fotossintéticos), e CP7, (gradiente dos índices de clorofila), contribuíram para o incremento da produtividade ( $\beta = 78,5956$  e  $68,7081$ , respectivamente). O componente CP8 (conteúdo de nutrientes na folha) promoveu redução significativa da produtividade ( $\beta = -82,9734$ ;  $p \leq 0,05$ ). O componente CP12, relacionado ao acamamento e aos conteúdos de enxofre na folha e nos grãos, apresentou tendência a reduzir a produtividade do sorgo.

O número de grãos por panícula foi influenciado principalmente pelos componentes CP3, relacionados à produção de biomassa e ao acúmulo de nutrientes na parte aérea, e CP11 (população de plantas e teor de enxofre na planta), ambos contribuindo para a redução dessa característica (Tabela 9). Por outro lado, CP7 (índices de clorofila destacando a relação clorofila *a* e *b*) favoreceu o aumento do número de grãos por planta. Semelhante ao CP3 e CP11, o componente CP5 (eficiência fotoquímica), apresentou tendência de reduzir a formação de grãos na panícula.

Para o peso de mil grãos, verificou-se efeito significativo da safra (Tabela 9), evidenciando redução média de 7,35 g na safra de 2024 em relação a 2023. Entre os componentes principais, o CP1 (gradiente de partição entre crescimento vegetativo e mobilização de nutrientes para os grãos) e o CP5 (eficiência fotoquímica da clorofila), contribuíram para a redução do peso de mil grãos. Em contraste, CP2 (balanço mineral da planta), CP4 (desempenho fotoquímico e dissipação energética), CP6 (pigmentos fotossintéticos), e CP10 (estrutura populacional e

composição mineral dos grãos) favoreceram o incremento do peso dos grãos. Esses resultados demonstraram que tanto as características fisiológicas ou o estado nutricional das plantas de sorgo influenciaram diretamente a formação e o enchimento dos grãos.

Em relação ao índice de colheita, os componentes CP3 (produção de biomassa e acúmulo de nutrientes na parte aérea), CP6 (pigmentos fotossintéticos) e CP7 (gradiente dos índices de clorofila) contribuíram significativamente para o aumento da partição de fotoassimilados para a produção de grãos (Tabela 9). Destes, o CP7 apresentou o maior efeito positivo ( $\beta = 0,0191$ ;  $p \leq 0,001$ ), seguido por CP6 ( $\beta = 0,0113$ ;  $p \leq 0,001$ ). Em contrapartida, CP9 (gradiente secundário de variação morfológica e nutricional), e CP12 (acamamento e teor foliar de enxofre), contribuíram para a redução do índice de colheita. Também observou-se tendência de redução dessa variável na safra de 2024.

Os componentes CP3, CP6 e CP7 influenciaram simultaneamente as variáveis de produtividade. O CP3, associado à produção de biomassa e ao acúmulo de nutrientes, relacionou-se negativamente com a produtividade e o número de grãos por panícula, sugerindo que o crescimento vegetativo excessivo e o acúmulo de reservas na parte aérea podem restringir a produtividade de grãos. Em contrapartida, o CP6 e o CP7, associados aos pigmentos e à organização do aparato fotossintético, correlacionaram-se positivamente com a produtividade, número de grãos por panícula (CP7), massa de mil grãos e índice de colheita (CP6).

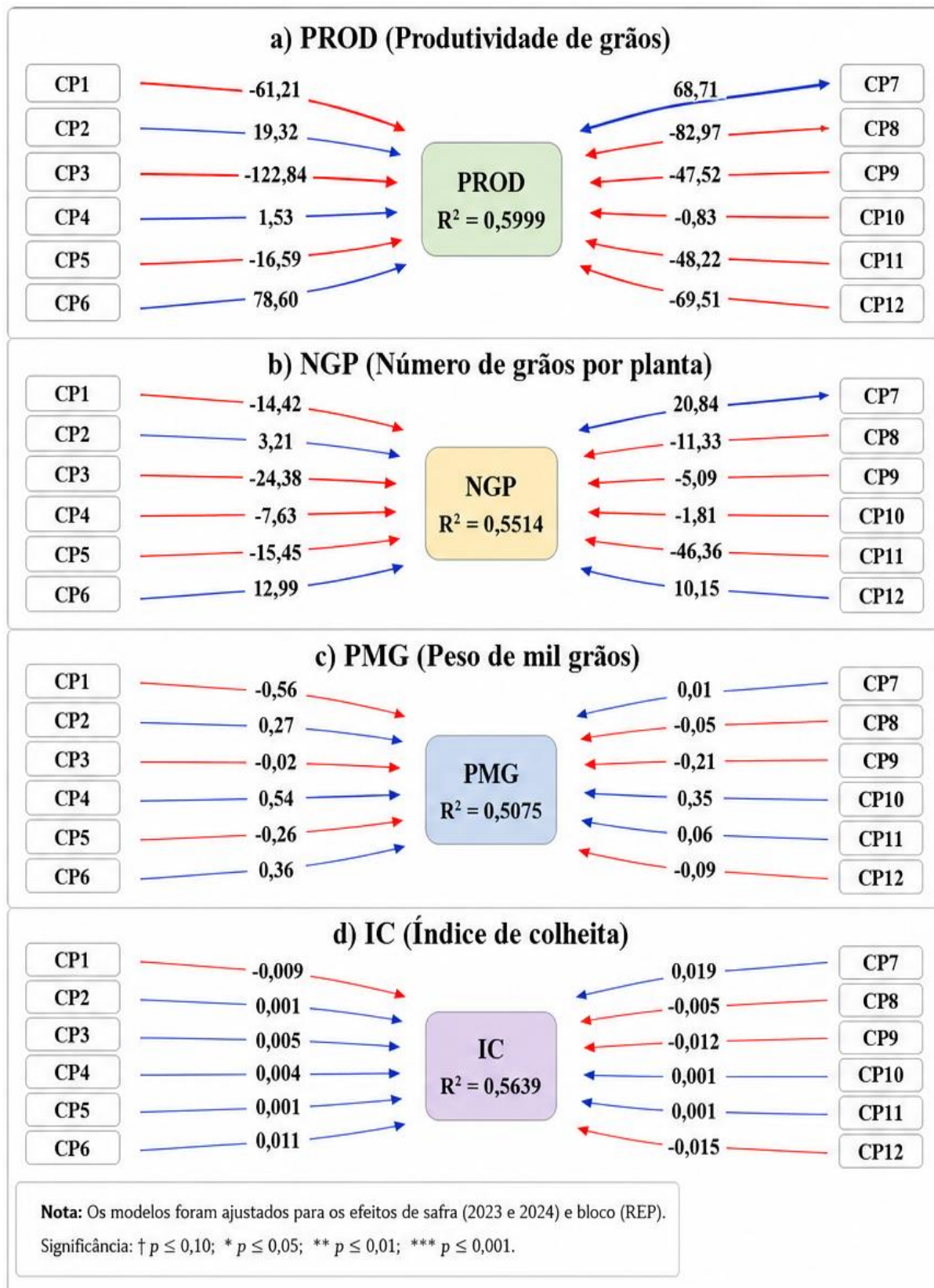
TABELA 9 - Coeficientes de regressão e de determinação ( $R^2$ ) para produtividade de grãos (PROD), número de grãos por panícula (NGP), peso de mil grãos (PMG) e índice de colheita (IC) do ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024

| Componentes          | PROD                |               | NGP                |               |
|----------------------|---------------------|---------------|--------------------|---------------|
|                      | $\beta$             | Cont. $R^2$   | $\beta$            | Cont. $R^2$   |
| CP1                  | -61,2074            | 0,1003        | -14,417            | 0,0517        |
| CP2                  | 19,3206             | 0,0133        | 3,206              | 0,0105        |
| CP3                  | <b>-122,8423***</b> | <b>0,2445</b> | <b>-24,376**</b>   | <b>0,1028</b> |
| CP4                  | 1,5311              | 0,014         | -7,63              | 0,0502        |
| CP5                  | -16,5913            | 0,0001        | -15,4520†          | 0,0081        |
| CP6                  | <b>78,5956**</b>    | <b>0,0352</b> | 12,989             | 0,0039        |
| CP7                  | <b>68,7081*</b>     | <b>0,0335</b> | <b>20,8430*</b>    | 0,0257        |
| CP8                  | <b>-82,9734*</b>    | <b>0,0306</b> | -11,327            | 0,0039        |
| CP9                  | -47,5178            | 0,0062        | -5,088             | 0,0031        |
| CP10                 | -0,8272             | 0,0001        | -1,808             | 0,0005        |
| CP11                 | -48,2226            | 0,0092        | <b>-46,3590***</b> | <b>0,0658</b> |
| CP12                 | -69,5082†           | 0,0141        | 10,145             | 0,0031        |
| R <sup>2</sup> total |                     | 0,5999        |                    | 0,5514        |

| Componentes          | PMG               |             | IC                |             |
|----------------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
|                      | $\beta$           | Cont. $R^2$ | $\beta$           | Cont. $R^2$ |
| CP1                  | <b>-0,5628**</b>  | 0,0001      | -0,0087           | 0,0087      |
| CP2                  | <b>0,2686***</b>  | 0,0567      | 0,001             | 0,0003      |
| CP3                  | -0,0222           | 0,0869      | <b>0,0053*</b>    | 0,0325      |
| CP4                  | <b>0,5405***b</b> | 0,0358      | 0,0036            | 0,001       |
| CP5                  | <b>-0,2555**</b>  | 0,0285      | 0,0014            | 0,0083      |
| CP6                  | <b>0,3584***</b>  | 0,0816      | <b>0,0113***</b>  | 0,0905      |
| CP7                  | 0,0105            | 0,0007      | <b>0,0191***</b>  | 0,2251      |
| CP8                  | -0,0455           | 0           | -0,0048           | 0,0092      |
| CP9                  | -0,2136           | 0,0055      | <b>-0,0117*</b>   | 0,0314      |
| CP10                 | <b>0,3509*</b>    | 0,0394      | 0,0007            | 0,0001      |
| CP11                 | 0,064             | 0,001       | 0,0005            | 0,0002      |
| CP12                 | -0,0863           | 0,0022      | <b>-0,0152***</b> | 0,067       |
| R <sup>2</sup> total |                   | 0,5075      |                   | 0,5639      |

Nota: PROD = produtividade de grãos; NGP = número de grãos por panícula; PMG = peso de mil grãos; IC = índice de colheita; CP1–CP12 = componentes principais 1 a 12;  $\beta$  = coeficiente de regressão parcial; Cont.  $R^2$  = contribuição parcial de cada componente principal para o coeficiente de determinação do modelo ( $R^2$ ). Os modelos foram ajustados por regressão múltipla sobre os escores dos componentes principais, incluindo os efeitos de safra e de bloco (REP). R<sup>2</sup> total = coeficiente de determinação do modelo completo. Significância: †  $p \leq 0,10$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$ .



## Descrição dos componentes principais (CPs) e variáveis mais associadas

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>CP1</b>  | <b>P, K, Mg e Zn no grão e na palha, oposto ao crescimento vegetativo</b><br>( $r_{CP1,Kg} = -0,96$ ; $r_{CP1,Pg} = -0,95$ ; $r_{CP1,Zng} = -0,94$ ; $r_{CP1,K,écg} = -0,94$ ;<br>$r_{CP1,Mg,B} = 0,92$ ; $r_{CP1,Arrg} = 0,91$ ; $r_{CP1,DC} = 0,90$ ; $r_{CP1,avap} = 0,89$ ; $r_{CP1,AF} = 0,87$ ) |
| <b>CP2</b>  | <b>Balanço N/S (folha, grão e palha) versus Ca, Fe, Mn e Zn na palha</b><br>( $r_{CP2,Na_g} = -0,84$ ; $r_{CP2,Ca_g} = -0,74$ ; $r_{CP2,Fe} = -0,74$ ; $r_{CP2,Zn_p} = -0,71$ ;<br>$r_{CP2,Np} = 0,73$ )                                                                                              |
| <b>CP3</b>  | <b>Acúmulo de N e S na planta (palha e grão) e massa seca</b><br>( $r_{CP3,PMSeCaRS} = -0,83$ ; $r_{CP3,Scap} = -0,76$ ; $r_{CP3,Mrap} = -0,63$ ;<br>$r_{CP3,MM} = -0,58$ )                                                                                                                           |
| <b>CP4</b>  | <b>Desempenho fotoquímico (PiAbs) e teores de Cu, B, Ca, Mn e Fe no grão</b><br>( $r_{CP4,Cuacg} = -0,55$ ; $r_{CP4,Bacg} = -0,52$ ; $r_{CP4,DioRC} = -0,50$ ;<br>$r_{CP4,BDSRC} = -0,49$ ; $r_{CP4,Piabs} = -0,46$ )                                                                                 |
| <b>CP5</b>  | <b>Eficiência fotoquímica do fotossistema II (fluxo de elétrons versus dissipação)</b><br>( $r_{CP5,Pnbm} = 0,72$ ; $r_{CP5,PhiDo} = -0,71$ ; $r_{CP5,DioRC} = -0,59$ ;<br>$r_{CP5,PiAbs} = 0,52$ ; $r_{CP5,PhiAb} = 0,50$ )                                                                          |
| <b>CP6</b>  | <b>Clorofilas a, b e total</b><br>( $r_{CP6,CarETOTFRL} = 0,55$ ; $r_{CP6,ChlBPFL} = 0,52$ , $r_{CP6,ChlAFiL} = 0,48$ )                                                                                                                                                                               |
| <b>CP7</b>  | <b>Clorofila b, Fe e acúmulo de N e S no grão</b><br>( $r_{CP7,Chla/ChlBrFL} = -0,44$ ; $r_{CP7,ChlBrFL} = 0,40$ )                                                                                                                                                                                    |
| <b>CP8</b>  | <b>Teores foliares de K, Mn, Cu, N e S</b><br>( $r_{CP8,K} = 0,42$ ; $r_{CP8,NaB} = 0,42$ ; $r_{CP6,CuP} = 0,35$ )                                                                                                                                                                                    |
| <b>CP9</b>  | <b>N (folha, grão e acúmulo) e comprimento de panícula</b><br>( $r_{CP9,Nakg} = -0,36$ ; $r_{CP9,Sakg} = -0,32$ ; $r_{CP9,NI} = -0,32$ )                                                                                                                                                              |
| <b>CP10</b> | <b>Acamamento, B e S no grão e população de plantas</b><br>( $r_{CP10,B} = 0,33$ ; $r_{CP10,Sj} = 0,31$ ; $r_{CP10,PPOPULMFRS} = 0,28$ )                                                                                                                                                              |
| <b>CP11</b> | <b>População de plantas e S/Zn na palha</b><br>( $r_{CP11,POPULMTRS} = -0,56$ ; $r_{CP11,SP} = 0,40$ )                                                                                                                                                                                                |
| <b>CP12</b> | <b>Acamamento e S (folha, grão e palha)</b><br>( $r_{CP12,ACAM} = 0,38$ ; $r_{CP12,Se} = 0,34$ )                                                                                                                                                                                                      |

### Direção do efeito:

- Positivo (aumento da variável dependente)
- Negativo (redução da variável dependente)

### Magnitude do coeficiente ( $|\beta|$ ):

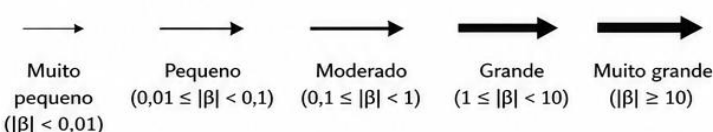


FIGURA 3 - Efeitos dos componentes principais (CP1–CP12) nas características produtivas e descrição dos gradientes multivariados associados referentes ao ensaio de fontes de fertilizantes na semeadura e adubação nitrogenada, em cobertura no sorgo granífero, em Rio Verde, Goiás, safras 2023 e 2024.

## 5 DISCUSSÃO

Na região Centro-Oeste, o sorgo granífero é predominantemente cultivado em sucessão à cultura da soja, conforme observado no presente estudo. Esse modelo expõe as plantas a um ambiente progressivamente mais seco a partir de abril, quando as chuvas diminuem de forma acentuada: em 2023 a precipitação acumulada foi de apenas 184,4 mm, enquanto em 2024 a disponibilidade hídrica foi mais favorável, com 438,4 mm (Figura 1). A queda na disponibilidade de água submete o sorgo ao estresse hídrico, o que desencadeia o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS) e eleva o estresse oxidativo nos tecidos vegetais.

O estresse oxidativo decorre principalmente da superprodução de oxidantes, capazes de causar danos estruturais e funcionais a componentes celulares vitais, entre eles o aparelho fotossintético. No sorgo, esse estresse enfraquece o fotossistema II (PSII), componente essencial das reações dependentes de luz. O dano se manifesta pela degradação da clorofila e pela redução da captura e assimilação de energia, com prejuízo à eficiência fotossintética (Miranda et al., 2014; Li et al., 2026) e, conseqüentemente, queda expressiva da produtividade de grãos. A sensibilidade do PSII ao estresse oxidativo induzido pela deficiência hídrica é corroborada pela modulação de proteínas relacionadas à fotossíntese e pela ativação de enzimas antioxidantes que mitigam os danos das ROS (Li et al., 2026). Apesar dessas respostas adaptativas, o estresse hídrico prolongado e severo, como o observado neste estudo, reduz substancialmente os teores de clorofila e a eficiência fotoquímica, com impacto negativo sobre a produtividade de grãos (Seleiman et al., 2021).

A absorção de nitrogênio ocorre predominantemente por fluxo de massa e, sob déficit hídrico, a redução da taxa transpiratória e o fechamento estomático limitam o transporte de  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NH}_4^+$  até a rizosfera (Iqbal et al., 2020). A menor disponibilidade hídrica reduz ainda a atividade da nitrato redutase, impedindo a assimilação do N absorvido (Liu et al., 2022). Em paralelo, a decomposição da palhada e dos nódulos da cultura precedente, material orgânico de baixa relação C/N, fornece N por mineralização contínua; esse suprimento basal residual eleva o estoque de N no solo e achata a curva de resposta à adubação mineral complementar (Correndo et al., 2021). Quando o teto produtivo é restringido sobretudo pelo déficit hídrico ou pelo estresse térmico, a água passa a ser o fator estritamente limitante e o acréscimo de N não se converte em biomassa ou grãos (Liu et al., 2022).

A aplicação de fertilizantes nitrogenados em solos com baixa umidade favorece o acúmulo de  $\text{NH}_3$  livre e eleva o potencial osmótico na zona radicular (Xian et al., 2023). Esse

estresse salino e amoniacal induz a superexpressão de ROS, provocando peroxidação lipídica e degradação de clorofila a, clorofila b e carotenoides (Li et al., 2021). Sem lâmina de água adequada, o N aportado não é incorporado a aminoácidos e proteínas; o acúmulo de intermediários nitrogenados não metabolizados sinaliza desequilíbrio metabólico, acelera a degradação de pigmentos e antecipa a senescência foliar (Xu et al., 2022). O resultado é a redução da eficiência do PSII e o comprometimento dos demais parâmetros fisiológicos: o estresse oxidativo na rizosfera e nas folhas danifica a proteína D1 do centro de reação do PSII, com queda da eficiência quântica máxima ( $F_v/F_m$ ) e do rendimento quântico efetivo ( $\Phi_{PSII}$ ) e aumento da dissipação não regulada de energia ( $Y(NO)$ ) (Xu et al., 2022; Zhang et al., 2022). O estresse osmótico imediato provocado pelos sais do fertilizante estimula a síntese de ácido abscísico (ABA) nas raízes, levando ao fechamento estomático reflexo, com queda acentuada da condutância estomática ( $g_s$ ) e da taxa assimilatória líquida de  $CO_2$  ( $A$ ) (Wang et al., 2023; Zhang et al., 2022). A peroxidação das membranas dos tilacoides compromete o transporte de elétrons e o gradiente de prótons e reduz a eficiência intrínseca no uso da água ( $EU_{Ai}$ ), uma vez que o gasto energético é desviado para mecanismos de reparo celular (Li et al., 2021; Wang et al., 2023).

O fornecimento de P favoreceu os gradientes associados à eficiência fotoquímica e à dissipação de energia (CP4), bem como a produção de biomassa (CP3). O fósforo regula a formação de ATP e NADPH e a translocação de fotoassimilados, estabilizando o PSII e reduzindo a dissipação de energia em condições de estresse (Carstensen et al., 2019; Pandey et al., 2021), o que se reflete no aumento do número e da massa de grãos (Gobeze et al., 2021). O nutriente influencia ainda a atividade da Rubisco e a regeneração da ribulose-1,5-bisfosfato, processos que frequentemente limitam a fotossíntese sob estresse nutricional. Além de elevar a fertilidade do solo, a adubação fosfatada incrementa a altura de plantas, o índice de área foliar e a eficiência fotossintética, ampliando a absorção de nutrientes e a produção de biomassa em culturas como milho e sorgo (Hao et al., 2024).

Nesse cenário, o S assume papel crucial, por ser fundamental para a síntese de moléculas antioxidantes e de enzimas que combatem o estresse oxidativo. Compostos contendo S, entre eles a glutatona, integram o metabolismo de defesa da planta ao capturar ROS e manter a homeostase redox sob estresse (Schneider et al., 2020). Ao sustentar e aprimorar o sistema antioxidante, a adubação com S atua como ferramenta de mitigação da degradação e de proteção do aparelho fotossintético sob estresse hídrico. Nos resultados deste estudo, o fornecimento de S com S15 otimizou o CP5, que diferiu do tratamento controle. Como esse componente representa o equilíbrio entre eficiência fotoquímica e dissipação de energia, o nutriente é essencial para a estabilidade do aparato fotossintético e para a proteção antioxidante (Zhou et al., 2019), além de

regular a assimilação do N (Koprivova & Kopriva, 2016). Dado que a síntese proteica exige disponibilidade simultânea de ambos os nutrientes, a deficiência de S limita a eficiência de uso do N e compromete a produção de biomassa (Hawkesford, 2019).

A importância de fertilizantes contendo P e S está em estimular a síntese dos aminoácidos sulfurados cisteína e metionina, indispensáveis à formação de proteínas estruturais dos fotossistemas e de metabólitos secundários como a glutatona. Esse composto atua como antioxidante-chave, mantendo a homeostase redox celular e protegendo o aparelho fotossintético do estresse oxidativo. Fertilizantes de semeadura contendo S, especialmente nas formas de sulfato e tiosulfato, aumentam a absorção e a produtividade de grãos (Ahmed et al., 2016; Chien et al., 2016); por outro lado, deficiências do nutriente comprometem a integridade das membranas dos tilacoides, com queda da eficiência fotoquímica, induzem estresse oxidativo e limitam a partição de fotoassimilados aos grãos, reduzindo a produtividade (Chien et al., 2016; Bista et al., 2023).

Os benefícios de fertilizantes com P e S se expressam no aumento da eficiência fotoquímica, na biossíntese de pigmentos e na proteção do aparelho fotossintético: a atuação do P no metabolismo energético e na regulação enzimática, combinada à síntese de proteínas estruturais e antioxidantes promovida pelo S, otimiza os processos fisiológicos e favorece o acúmulo de biomassa e de nutrientes. A aplicação isolada de N na semeadura, ao contrário, costuma estimular crescimento vegetativo vigoroso e efeitos de diluição de nutrientes, desequilíbrio que afeta o teor de pigmentos e a eficiência de uso da energia, amplia a dissipação não fotoquímica e limita a produção de biomassa (Chien et al., 2016; Bista et al., 2023). Em cobertura, o N pode aumentar a espessura da folha, o acúmulo nos grãos (CP8) e o acamamento das plantas (CP10); no entanto, o excesso de N desacompanhado de P e S induz desbalanços nutricionais e elevação da dissipação de energia (Xu et al., 2020; Zhang et al., 2021). Esse antagonismo foi confirmado pela interação Fertilizante x N no CP5, em que o S15 apresentou menor desempenho na presença de N em cobertura, o que sugere que fertilizantes sulfurados são sensíveis ao excesso de N quando há desequilíbrio nutricional, com comprometimento da homeostase redox e do PSII (Takahashi et al., 2020; Anjum et al., 2022).

Apesar da tolerância do sorgo à seca e do uso eficiente da água, a cultura requer suprimento adequado de nutrientes nos estágios iniciais de crescimento para sustentar o desenvolvimento radicular e a expansão da área foliar necessários à produção de assimilados (Ahmed, 2016; Bista et al., 2023). O uso de fertilizantes com P e S mitiga os desequilíbrios no solo e nos teores de nutrientes das plantas que, de outra forma, levam a um desempenho subótimo quando apenas o N é aplicado isoladamente.

A análise de componentes principais (PCA) reduziu a dimensionalidade do conjunto de dados retendo doze componentes principais, que explicaram parte substancial da variabilidade total e apresentaram correlação nula entre si, confirmando a independência dos gradientes identificados. A PCA eliminou ainda problemas de multicolinearidade e mostrou que 78,1% das variáveis apresentaram associação relevante com os eixos multivariados identificados (Kondombo et al., 2024). Os efeitos dos tratamentos não se distribuíram uniformemente, concentrando-se em processos fisiológicos e nutricionais específicos, como a eficiência fotoquímica, a constituição dos pigmentos fotossintéticos, o acúmulo mineral e a partição de biomassa e nutrientes (Kondombo et al., 2024; Ostmeyer et al., 2022). O manejo nutricional mostrou forte modulação temporal entre as safras, refletindo a dependência das respostas fisiológicas em relação às variações climáticas interanuais (Assefa et al., 2020; Ostmeyer et al., 2022).

No eixo de alocação de nutrientes (CP1), escores mais elevados estiveram associados à expressão de atributos vegetativos, padrão característico do tratamento controle, enquanto escores mais baixos refletiram a maior mobilização de nutrientes para os grãos, direcionada pelo uso de ureia na semeadura na safra 2024 (Ostmeyer et al., 2022). Quanto ao aparato fotoquímico e aos pigmentos (CP4, CP5 e CP6), os fertilizantes favoreceram o desempenho fotossintético em 2024, enquanto a ureia esteve associada à maior dissipação energética e a ausência de nitrogênio elevou os índices de clorofila em 2023 (Li et al., 2022; Ostmeyer et al., 2022). Para o acúmulo de biomassa e minerais (CP3, CP8 e CP10), fontes como fosfato monoamônio + ureia (MAP + ureia) e S15 promoveram maior acúmulo de biomassa seca e de nutrientes na parte aérea, com o MAP + ureia exibindo resposta altamente dependente do ambiente entre safras (Assefa et al., 2020).

O CP3 destacou-se como o principal eixo determinante da variação produtiva e correlacionou-se negativamente com a produtividade de grãos, o número de grãos por panícula e o peso de mil grãos, indicando que a retenção excessiva de biomassa e reservas na parte aérea atuou de forma antagônica ao rendimento final, enquanto a eficiência fotossintética e os índices de clorofila (CP6 e CP7) exerceram o papel primário no desempenho agrônomo da cultura (Adams et al., 2021; Li et al., 2022; Ostmeyer et al., 2022).

Os modelos de regressão múltipla demonstraram capacidade explicativa moderada ( $R^2$  entre 0,5075 e 0,5999), sendo a produtividade de grãos a variável de maior ajuste ( $R^2 = 0,5999$ ), fortemente influenciada pelo acúmulo de nutrientes e pelos pigmentos fotossintéticos. Os fertilizantes S15, Super Simples e Fosfato Monoamônio + Ureia promoveram maior número de grãos por panícula e maior produtividade de grãos na safra 2023. O aumento da produtividade do sorgo granífero esteve diretamente associado ao maior peso individual e número de grãos por

panícula, além da eficiência de conversão da biomassa produzida em rendimento (Adams et al., 2021; Ostmeier et al., 2022). A abordagem multivariada identificou as interações fisiológicas e nutricionais que governam o desempenho agrônomo, evidenciando a necessidade de integrar atributos fisiológicos, nutricionais e agrônomo na determinação da produtividade do sorgo granífero.

A máxima expressão do potencial produtivo do sorgo granífero em sucessão à soja depende de estratégias de manejo que priorizem o fornecimento de N, P e S na semeadura. A integração das variáveis fisiológicas, nutricionais e agrônomo via análise de componentes principais confirma que o fornecimento de P e S (S15 e Super Simples) ou de P (Fosfato Monoamônio + Ureia) otimizou a eficiência fotoquímica, o conteúdo de pigmentos fotossintéticos, o acúmulo de biomassa e a produtividade de grãos. Em contrapartida, a adubação nitrogenada exclusiva na semeadura, assim como o uso isolado de N em cobertura, comprometeu as características fisiológicas e o desempenho produtivo da cultura. Para maximizar a produtividade e mitigar os efeitos dos estresses hídrico e oxidativo em ambientes tropicais, o manejo nutricional deve conciliar fontes fosfatadas e sulfuradas à adubação nitrogenada, suprimindo a aplicação isolada de N.

## 6 CONCLUSÕES

A análise multivariada permitiu condensar a variabilidade dos dados, em doze componentes principais, enquanto os modelos de regressão múltipla demonstraram capacidade explicativa moderada para o desempenho do sorgo granífero.

O CP3 (gradiente de biomassa seca e acúmulo de N e S) apresentou as maiores associações com os componentes de rendimento, correlacionando-se negativamente com a produtividade de grãos, o número de grãos por panícula e o peso de mil grãos;

A produtividade de grãos apresentou o maior ajuste nos modelos, sendo fortemente influenciada pelos componentes associados ao acúmulo de nutrientes e aos pigmentos fotossintéticos, além de ter correlação positiva com o número de grãos por panícula, o peso de mil grãos e o índice de colheita e

Os fertilizantes S15, Super Simples e Fosfato Monoamônio + Ureia promoveram maior número de grãos por panícula e produtividade de grãos na safra 2023.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, H. P.; SCHOENAU, J. J. Effects of seed-placed sulfur fertilizers on canola, wheat, and pea yield; sulfur uptake; and soil sulfate concentrations over time in three prairie soils. **Journal of Plant Nutrition**, v. 40, n. 4, p. 543–557, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1262413>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- ANJUM, N. A. *et al.* Sulfur nutrition and redox homeostasis in plants under stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 194, p. 104704, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104704>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- BARTZIALIS, D. *et al.* Assessing the efficiency of different nitrogen fertilization levels on sorghum yield and quality characteristics. **Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 1253, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture13061253>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- BATAGLIA, O. C. *et al.* **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1983.
- BHEEMANAHALLI, R. *et al.* Anatomical traits of wild-rices reveal links between flooded rice and dryland sorghum. **Plant Physiology Reports**, v. 24, p. 155-167, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40502-019-00445-6>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- CARSTENSEN, A. *et al.* The impacts of phosphorus deficiency on the photosynthetic electron transport chain. **Plant Physiology**, v. 179, p. 241–255, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.18.01358>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- CHIEN, S. H.; GEARHART, M. M.; VILLAGARCIA, S. Agronomic Effectiveness of Granular Nitrogen/Phosphorus Fertilizers Containing Elemental Sulfur with and without Ammonium Sulfate: A Review. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 3, p. 1203–1213, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0276>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- COELHO, A. M. Extração, exportação e ciclagem de nutrientes por híbridos de sorgo grânifero. Sete Lagoas: **Embrapa Milho e Sorgo**, 2023. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1157340>. Acesso em :10 mar. 2026.
- CORRENDON, A. A. Nitrogen credit from soybean to subsequent cereal crops: A global meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 267, p. 108155, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108155>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- DEMBELE, J. S. B. *et al.* Density and nitrogen fertilization optimization on sorghum grain yield in Mali. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 6, p. 4705-4720, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agj2.20815>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- DUARTE, A. P. *et al.* Acúmulo de matéria seca e nutrientes em cultivares de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 2, n. 3, p. 1-20, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v2n3p1-20>. Acesso em: 10 mar. 2026.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

GERIK, T.; BEAN, B.; VANDERLIP, R. **Sorghum growth and development**. College Station: Texas A&M University, 2024.  
file:///C:/Users/Admin/Downloads/Sorghum\_Growth\_and\_Development.pdf. Acesso em: 10 mar. 2026.

GLOI, A. M.; BUCHANAN, R. Dosimetric assessment of prostate cancer patients through principal component analysis (PCA). **Journal of Applied Clinical Medical Physics**, v. 14, n. 1, p. 40–49, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1120/jacmp.v14i1.3882>. Acesso em: 10 mar. 2026.

GOBEZE, T.; TANA, T.; ABEBE, T. Response of grain sorghum to phosphorus fertilizer rates. **Cogent Food & Agriculture**, v. 7, p. 1933749, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23311932.2021.1933749>. Acesso em: 10 mar. 2026.

HAO, F. *et al.* Impact of different types of nitrogen and phosphorus compound fertilizers on maize yield and drip emitter clogging using secondary sewage effluent. **Frontiers in Environmental Science**, v. 12, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1502902>. Acesso em: 10 mar. 2026.

HAWKESFORD, M. J. Nitrogen homeostasis in plants. **Annals of Botany**, v. 124, n. 2, p. 147–158, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/aob/mcz007>. Acesso em: 10 mar. 2026.

HAWKESFORD, M. J.; KOPRIVA, S. Sulfur and phosphorus interactions in plant metabolism. **Plant Physiology**, v. 187, n. 1, p. 103–118, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab190>. Acesso em: 10 mar. 2026.

IQBAL, A. *et al.* Unraveling the physiological and biochemical mechanisms of nitrogen use efficiency in crops under drought stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 562744, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.562744>. Acesso em: 10 mar. 2026.

KHALFALLA, M.; ABDALLA, M.; ELSAYED, A. Promoting the elemental profile of sorghum grain under nitrogen fertilizer. **Heliyon**, v. 10, n. 7, e28502, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28502>. Acesso em: 10 mar. 2026.

KOPRIVA, S.; MALAGOLI, M.; TAKAHASHI, H. Sulfur nutrition: impacts on plant development. **Journal of Experimental Botany**, v. 70, n. 16, p. 4069–4083, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erz192>. Acesso em: 10 mar. 2026.

KOPRIVOVA, A.; KOPRIVA, S. Sulfur assimilation and its role in plant development. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 440, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00440>. Acesso em: 10 mar. 2026.

LEISER, W. L. *et al.* Phosphorus efficiency and root traits in sorghum. **Crop Science**, v. 54, p. 1–12, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.10.0706>. Acesso em: 10 mar. 2026.

LI, H. *et al.* Physiological and Proteomic Analysis of Sorghum Bicolor Seedling Leaves Reveals Molecular Responses to PEG-Induced Drought Stress. **Plants**, v. 15, n. 8, p. 1255, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants15081255>. Acesso em: 10 mar. 2026.

LI, S. *et al.* Mechanisms of nitrogen-induced reduction in photosynthetic pigments under abiotic stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 188, p. 104510, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104510>. Acesso em: 10 mar. 2026.

LI, X.; ZHANG, L.; WANG, Y. Nitrogen effects on chlorophyll stability. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 155, p. 1–10, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.07.012>. Acesso em: 10 mar. 2026.

LIU, Z. *et al.* Interactive effects of water deficit and nitrogen supply on crop yield and nitrogen utilization: A meta-analysis. **Agricultural Water Management**, v. 269, p. 107684, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107684>. Acesso em: 10 mar. 2026.

MAHESHWARI, A.; KUMAR, P.; SHARMA, R. Principal Component Analysis: Progress and Applications. **Newborn**, v. 5, n. 1, p. 20–25, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.5005/jp-journals-11002-0150>. Acesso em: 10 mar. 2026.

MALAVOLTA, E. *et al.* **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MIRANDA, R. D. S. *et al.* Nitrate: ammonium nutrition alleviates detrimental effects of salinity by enhancing photosystem II efficiency in sorghum plants. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, suppl, p. 8–12, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18nsupps8-s12>. Acesso em: 10 mar. 2026.

NETONDO, G. W. *et al.* Stomatal regulation and abscisic acid signaling under abiotic stress in sorghum (*Sorghum bicolor*). **Environmental and Experimental Botany**, v. 195, p. 104720, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104720>. Acesso em: 10 mar. 2026.

OBEROI, H. K. *et al.* Sulfur fertilization in fodder sorghum. **Journal of Plant Nutrition**, v. 46, n. 8, p. 1787-1807, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2155546>. Acesso em: 10 mar. 2026.

OLANREWAJU, O. S. *et al.* Synergistic impacts of combined drought and heat stress on vegetative growth and photosynthetic apparatus of C4 crops. **Agricultural Water Management**, v. 291, p. 108600, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108600>. Acesso em: 10 mar. 2026.

OLIVEIRA, S.; SILVA, A. G.; SIMON, G. A. Performance of grain sorghum in integrated systems. **Agronomy**, v. 10, n. 11, p. 1714, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy10111714>. Acesso em: 10 mar. 2026.

ORTIZ, D. *et al.* Dissecting the genetic control of natural variation in sorghum photosynthetic response to drought stress. **Journal of Experimental Botany**, v. 73, n. 10, p. 3251-3267, 2022. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac085>. Acesso em: 10 mar. 2026.

OSTMEYER, T. J. *et al.* Enhancing sorghum yield through efficient use of nitrogen – challenges and opportunities. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, art. 845443, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.845443>. Acesso em: 10 mar. 2026.

OSTMEYER, T. J.; PRASAD, P. V. V.; JAGADISH, S. V. K. Enhancing sorghum yield through nitrogen use. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 845443, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.845443>. Acesso em: 10 mar. 2026.

REYES-CABRERA, J.; ERICKSON, J. E.; LEON, R. G. Nitrogen and water-use efficiency in sorghum. **Field Crops Research**, v. 294, p. 108878, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108878>. Acesso em: 10 mar. 2026.

SCHLEGEL, A. J.; HAVLIN, J. L. Irrigated sorghum response to 55 years of fertilization. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 1, p. 464–477, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agj2.20485>. Acesso em: 10 mar. 2026.

SCHNEIDER, J. R.; KOCH, F.; SANGOI, L. Soybean Plant Metabolism under Water Deficit and Xenobiotic and Antioxidant Agent Application. **Biology**, v. 9, n. 9, p. 266, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/biology9090266>. Acesso em: 10 mar. 2026.

SELEIMAN, M. F. *et al.* Drought stress on crop production and mitigation strategies: a review. **Agronomy**, v. 11, n. 2, art. 273, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020273>. Acesso em: 10 mar. 2026.

SHARMA, R. K.; KUMAR, A.; SINGH, V. Revisiting the role of sulfur in crop production. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 15, p. 101013, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101013>. Acesso em: 10 mar. 2026.

SILVA, A. G.; FRANCISCHINI, R.; GOULART, M. M. P. Desempenho agronômico de híbridos de sorgo. **Revista de Agricultura**, v. 90, n. 1, p. 17-30, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.37856/bja.v90i1.135>. Acesso em: 10 mar. 2026.

STRASSER, R. J.; TSIMILLI-MICHAEL, M.; SRIVASTAVA, A. The fluorescence transient as a tool to characterize photosynthesis. **Probing photosynthesis**. London: Taylor & Francis, 2000. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/252250818\\_The\\_fluorescence\\_transient\\_as\\_a\\_tool\\_to\\_characterize\\_and\\_screen\\_photosynthetic\\_samples](https://www.researchgate.net/publication/252250818_The_fluorescence_transient_as_a_tool_to_characterize_and_screen_photosynthetic_samples). Acesso em: 10 mar. 2026.

TAKAHASHI, H.; KOPRIVA, S.; GIORDANO, M. Sulfur metabolism and photosynthetic performance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 71, p. 97–124, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-041719-095906>. Acesso em: 10 mar. 2026.

TARIQ, M. *et al.* Intrinsic water-use efficiency and carbohydrate remobilization dynamics in Sorghum bicolor under progressive water deficit. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 198, p. 107650, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107650>. Acesso em: 10 mar. 2026.

VELINOV, I.; TODOROV, Z.; KOSTADINOVA, S. Dry mass and nitrogen accumulation in sorghum. **Agronomy Journal**, v. 61, n. 2, p. 213–218, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2018.05.0321>. Acesso em: 10 mar. 2026.

XIAN, P. *et al.* Ammonium toxicity and photosynthetic impairment in crop plants under nitrogen excess. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 196, p. 107580, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107580>. Acesso em: 10 mar. 2026.

XU, G.; FAN, X.; MILLER, A. J. Plant nitrogen assimilation. **Annual Review of Plant Biology**, v. 71, p. 153–182, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040532>. Acesso em: 10 mar. 2026.

XU, J. *et al.* Excess nitrogen application induces oxidative stress and reduces photosystem II efficiency in crops during water deficit. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 892100, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.892100>. Acesso em: 10 mar. 2026.

ZHANG, H. *et al.* Fertilizer-induced osmotic stress impairs photosystem II photochemistry and stomatal conductance in field crops. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 208, n. 3, p. 341-352, 2022. <https://doi.org/10.1111/jac.12582>. Acesso em: 10 mar. 2026.

ZHANG, Y.; LI, H.; ZHAO, X. Nutrient imbalances induced by nitrogen fertilization. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 4, p. 2951–2965, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agj2.20700>. Acesso em: 10 mar. 2026.

ZHANG, Y. *et al.* Non-stomatal limitations, photochemical efficiency, and chlorophyll degradation in sorghum under severe stress. **Photosynthetica**, v. 62, n. 1, p. 45-56, 2024. <https://doi.org/10.32615/ps.2024.005>. Acesso em: 10 mar. 2026.

ZHOU, W.; ZHANG, L.; LIU, X. Sulfur deficiency reduces grain protein in sorghum. **Journal of Cereal Science**, v. 89, p. 102–110, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.06.002>. Acesso em: 10 mar. 2026.