

**AGROTEC**Revista Agropecuária Técnica
Since 1981

ISSN impresso 0100-7467 - ISSN online 2525-8990

AGRARIAN SCIENCE AND TECHNOLOGY

Interação entre Nitrogênio e Potássio na Modulação da Produtividade e Qualidade Físico-Química de Espigas de Milho Verde

Begna Janine da Silva¹, Pedro Henrique Menezes¹, Claudiana Vêras¹, Adailson P. de Souza¹,
Márcia Roseane Targino de Oliveira¹, Normando Ribeiro-Filho¹

Resumo

Este estudo investigou a influência das doses de nitrogênio (N) e potássio (K) sobre atributos morfológicos, produtivos e físico-químicos de espigas de milho verde cultivadas em delineamento fatorial. Observou-se que combinações equilibradas de N×K aumentaram comprimento, diâmetro, peso da espiga, número e massa de grãos, evidenciando maior eficiência reprodutiva. Paralelamente, parâmetros químicos como pH, acidez total, sólidos solúveis, amido e carotenoides foram modulados pela nutrição mineral, indicando ajustes metabólicos associados à disponibilidade de nutrientes. Análises multivariadas (dendrogramas, PCA e correlação de Pearson) revelaram interdependência estrutural entre produtividade, composição química e acúmulo de reservas energéticas, permitindo discriminar tratamentos com alto desempenho agrônomico e qualidade tecnológica superior. Os resultados demonstram que o manejo balanceado de N e K otimiza simultaneamente rendimento e qualidade dos grãos, oferecendo base científica para recomendações de adubação mais eficientes e sustentáveis na produção de milho verde.

Palavras-chave: adubação mineral; Zea mays L.; produtividade de grãos; qualidade físico-química; análise multivariada.

Abstract

This study evaluated the combined effects of nitrogen (N) and potassium (K) fertilization on morphological, productive, and physicochemical traits of green maize ears using a factorial design. Balanced N×K combinations significantly increased ear length and diameter, ear weight, grain number, and grain mass, indicating enhanced reproductive efficiency. Chemical attributes, including pH, titratable acidity, soluble solids, starch, and total carotenoids, were also modulated by mineral nutrition, reflecting metabolic adjustments linked to nutrient availability. Multivariate analyses (hierarchical clustering, PCA, and Pearson correlation) revealed strong interdependence among productivity, chemical composition, and reserve accumulation, enabling discrimination of treatments with superior agronomic performance and technological quality. The findings demonstrate that optimized N and K management simultaneously improves yield and grain quality, providing robust scientific evidence for more efficient and sustainable fertilization strategies in green maize production systems. These results highlight the integrated role of macronutrient balance in shaping productive and nutritional profiles of maize ears.

Key-words: mineral fertilization; Zea mays L.; grain yield; physicochemical quality; multivariate analysis.

Submetido em 12/10/2023;

¹Departamento de Solos e Engenharia Rural, DSER/CCA/UFPB – Bairro universitário, SN, CEP: 58.397-000, Areia-PB, Paraíba, Brasil

Email: normandofilho@cca.ufpb.br * (Autor correspondente)

1. Introdução

O milho (*Zea mays* L.) destaca-se como um dos cereais mais relevantes para a segurança alimentar mundial, devido à sua ampla utilização na alimentação humana, animal e em diversas cadeias agroindustriais. Sua elevada adaptabilidade edafoclimática, aliada ao alto potencial produtivo e valor nutritivo, consolidou essa cultura como base de sistemas agrícolas intensivos e familiares em diferentes regiões do mundo (Silva & de Souza, 2020; Scott & Eldridge, 2005). Além de constituir matéria-prima para inúmeros produtos alimentícios e industriais, o milho exerce papel socioeconômico estratégico, contribuindo para geração de renda e estabilidade produtiva em pequenas e médias propriedades rurais. No Brasil, o milho verde apresenta particular importância por permitir comercialização direta para consumo fresco e processamento artesanal, agregando valor ao produto e ampliando oportunidades econômicas (Santos et al., 2005). Assim, a cultura do milho combina relevância alimentar, tecnológica e econômica, sendo fundamental para o desenvolvimento sustentável da agroindústria e da agricultura familiar.

A adubação mineral exerce influência decisiva sobre a produtividade de grãos e a qualidade física e físico-química do milho, especialmente pela atuação do nitrogênio e do potássio no metabolismo vegetal. O nitrogênio é o nutriente mais demandado pela cultura, participando diretamente da síntese de proteínas, enzimas e clorofila, o que impacta o crescimento vegetativo e o enchimento de grãos (Silva & de Souza, 2020; Amado et al., 2002; Cantarella & Duarte, 2004). O potássio, por sua vez, regula o balanço hídrico, a ativação enzimática e o transporte de fotoassimilados, influenciando a formação de amido, açúcares e compostos bioativos (Malavolta et al., 1997; Martin et al., 2011). A disponibilidade adequada desses nutrientes pode determinar não apenas o rendimento agrônomico, mas também a composição química dos grãos, incluindo sólidos solúveis, amido e carotenoides, atributos essenciais para aceitação do consumidor e aplicação industrial (Silva & de Souza, 2020; Scott & Eldridge, 2005). Dessa forma, o manejo equilibrado da adubação N×K é crucial para maximizar produtividade e qualidade tecnológica do milho.

A análise multivariada tem se consolidado como ferramenta robusta para interpretar a complexidade das respostas agrônomicas e químicas em sistemas agrícolas, permitindo compreender interações entre múltiplas variáveis simultaneamente. Métodos tradicionais baseados na variação de um fator por vez apresentam limitações ao desconsiderar efeitos de interação, enquanto abordagens como o Planejamento Experimental Fatorial (PEF) e a Análise de Componentes Principais (PCA) possibilitam modelar fenômenos biológicos de forma integrada (Myers et al., 2009; Anjum et al., 1997). A PCA, amplamente utilizada na ciência de alimentos, permite reduzir a dimensionalidade de dados complexos, identificando padrões, correlações e agrupamentos entre tratamentos e atributos de qualidade (Abdi & Williams, 2010). Assim, o uso de ferramentas multivariadas amplia a capacidade interpretativa dos resultados, contribuindo para decisões agrônomicas mais precisas e fundamentadas.

Nesse contexto, o presente estudo apresenta caráter inovador ao integrar avaliação agrônômica, físico-química e análise multivariada para investigar o efeito combinado de doses fatoriais de nitrogênio e potássio em milho verde híbrido AG 1051. A novidade reside na abordagem simultânea de parâmetros morfológicos, produtivos e qualitativos, aliada à aplicação de técnicas estatísticas avançadas para identificação de perfis tecnológicos e padrões de resposta nutricional. Essa estratégia permite compreender de forma sistêmica como o manejo mineral modula a produtividade e a qualidade dos grãos destinados ao consumo fresco e à agroindustrialização. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito combinado de doses de N e K sobre características morfológicas, produtivas e físico-químicas de espigas de milho verde, utilizando análises univariadas e multivariadas para identificar tendências e correlações. Os resultados possuem aplicações diretas na recomendação de manejo nutricional, no melhoramento de cultivares e na otimização da qualidade tecnológica do milho para consumo e processamento agroindustrial.

2. Metodologia

2.1. Planejamento experimental e coleta do milho

O experimento foi conduzido com milho híbrido AG 1051 cultivado na área experimental do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, em Areia-PB, em Latossolo vermelho-amarelo. O delineamento experimental seguiu a matriz Plan Puebla III, em esquema fatorial (Plan Puebla III) envolvendo cinco doses de nitrogênio (5, 30, 50, 70 e 95 kg ha⁻¹), aplicadas na forma de ureia, e cinco doses de potássio (4, 24, 40, 56 e 76 kg ha⁻¹), na forma de cloreto de potássio, acrescidas de uma testemunha absoluta sem adubação, totalizando 11 tratamentos (Tabela 1). As parcelas foram compostas por sete linhas de 10 m de comprimento, espaçadas em 1 m, perfazendo área de 70 m² por parcela. Foi realizada adubação fosfatada em fundação (80 kg ha⁻¹) em todas as parcelas; o potássio e 30% do nitrogênio foram aplicados em fundação, enquanto o restante do nitrogênio foi aplicado em cobertura aos 40 dias após o plantio. O material experimental consistiu em espigas de milho, colhidos manualmente aos 82 dias após o plantio, com teor de umidade aproximado de 85%.

Tabela 1: Matriz Plan Puebla III para as doses de Nitrogênio (Uréia) e Potássio (KCl).

Tratamento	Kg ha ⁻¹	
	N	K
T1	30	24
T2	30	56
T3	70	24
T4	70	56
T5	50	40
T6	5	24
T7	95	56
T8	30	4
T9	70	76
T10	5	4
T11	0	0

2.2. Análise morfológicas e físico-químicas

A amostragem laboratorial, seis espigas por tratamento foram coletadas aleatoriamente nas primeiras horas da manhã, acondicionadas em sacos plásticos identificados e transportadas ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Agropecuários do CCA/UFPB. Foram avaliados comprimento (C) e diâmetro (D) da espiga, peso da espiga despalhada (PED), peso do sabugo (PS), número de grãos (NG) e peso dos grãos (PG). Em seguida, as espigas foram despalhadas, lavadas em água corrente e água destilada, secas em temperatura ambiente e os grãos retirados manualmente com faca de aço inoxidável. As amostras foram trituradas e homogeneizadas em liquidificador doméstico para posterior determinação dos parâmetros físico-químicas incluindo pH, acidez total (TA, mg/100g), sólidos solúveis (SS, °Brix), amido (g/100 g) e carotenoides totais (mg/Kg). Os carotenoides totais foram determinados por espectrofotometria a 450 nm utilizando solução extratora de hexano 80%, segundo Higby (1962). Os demais parâmetros foram determinados seguindo as recomendações de Brasil (2008).

2.3. Análise de dados

As análises estatísticas foram realizadas utilizando os softwares Microsoft Excel®. Os resultados obtidos a partir do Planejamento Composto Central (PCC) para dois fatores (nitrogênio e potássio)

foram inicialmente submetidos à análise de variância (ANOVA), seguida do teste de comparação de médias de Tukey ($p < 0,05$), com o objetivo de identificar diferenças significativas entre os tratamentos quanto aos parâmetros físicos e físico-químicos avaliados. Adicionalmente, foi empregada a Análise de Componentes Principais (PCA) para reduzir a dimensionalidade do conjunto multivariado de dados e facilitar a interpretação das relações entre tratamentos e variáveis avaliadas. A PCA foi aplicada considerando os atributos biométricos (comprimento, diâmetro, peso da espiga despalhada, peso do sabugo, número e peso de grãos) e parâmetros químicos (pH, acidez total, sólidos solúveis, amido e carotenoides totais) obtidos nos 11 tratamentos. A seleção dos componentes principais baseou-se nos Critérios de Kaiser (autovalores > 1) e na variância cumulativa superior a 60%, sendo os resultados apresentados em biplots que evidenciam agrupamentos e tendências entre tratamentos e variáveis. Finalmente, foi construída uma matriz de correlação de Pearson para quantificar a intensidade e direção das associações lineares entre os parâmetros avaliados, permitindo identificar correlações positivas e negativas relevantes para a interpretação agrônômica e tecnológica dos efeitos da adubação nitrogenada e potássica sobre a qualidade do milho verde.

3. Resultados

O experimento foi conduzido com milho híbrido AG 1051 em Latossolo vermelho-amarelo, utilizando delineamento Plan Puebla III com cinco doses de nitrogênio e potássio, além de uma testemunha sem adubação, totalizando 11 tratamentos. As espigas foram colhidas manualmente aos 82 dias após o plantio e avaliadas quanto a atributos morfológicos e físico-químicos. Determinaram-se comprimento, diâmetro, pesos da espiga e do sabugo, número e peso de grãos, bem como pH, acidez total, sólidos solúveis, amido e carotenoides totais. Os dados foram submetidos à ANOVA e teste de Tukey ($p < 0,05$), além de PCA e correlação de Pearson para interpretação multivariada das respostas à adubação nitrogenada e potássica.

3.1. Influência de nitrogênio e potássio nos parâmetros morfológicos do milho

O comprimento (C) e o diâmetro (D) das espigas evidenciaram respostas diferenciadas aos níveis fatoriais de N e K avaliados. Observou-se variação no comprimento entre 19 cm (T10) e 25 cm (T4), enquanto o diâmetro oscilou de 4 cm (T1, T10 e T11) a 6 cm (T3) (Figura 1). Os tratamentos com doses intermediárias a elevadas de nutrientes, como T4 ($70-56 \text{ kg ha}^{-1}$), apresentaram os maiores valores simultâneos de C (25 cm) e D (5 cm), sugerindo maior expansão da espiga (Figura 1). Em contraste, tratamentos com menores níveis nutricionais, como T10 ($5-4 \text{ kg ha}^{-1}$), resultaram em menor comprimento (19 cm) e diâmetro reduzido (4 cm), indicando limitação no crescimento estrutural (Figura 1). O tratamento T3 ($70-24 \text{ kg ha}^{-1}$) destacou-se pelo maior diâmetro (6 cm), mesmo com comprimento intermediário (24 cm), indicando efeito diferenciado do potássio sobre a expansão radial (Figura 1). Os resultados demonstram que o adequado suprimento de N e K promove espigas mais longas e robustas, refletindo melhor desenvolvimento morfológico.

O peso da espiga despalhada (PED) e o peso do sabugo (PS) apresentaram ampla variação entre os tratamentos do planejamento fatorial. O PED variou de 73 g (T11) a 179 g (T4), enquanto o PS oscilou de 38 g (T1) a 83 g (T4), evidenciando forte influência da adubação N-K sobre a biomassa da espiga (Figura 1). O tratamento T4 ($70-56 \text{ kg ha}^{-1}$) destacou-se com os maiores valores de PED (179 g) e PS (83 g), indicando maior acúmulo de matéria estrutural e reprodutiva (Figura 1). Em contraste, doses muito baixas de nutrientes, como em T11 ($0-0 \text{ kg ha}^{-1}$), resultaram em menor PED (73 g) e PS relativamente elevado (47 g), sugerindo menor eficiência na formação de grãos (Figura 1). Tratamentos intermediários, como T5 ($50-40 \text{ kg ha}^{-1}$), apresentaram valores moderados de PED

(127 g) e PS (59 g), evidenciando resposta gradual às doses aplicadas. Portanto, maiores disponibilidades de N e K aumentam o peso da espiga e do sabugo, refletindo maior vigor produtivo.

O número de grãos (NG) e o peso de grãos (PG) responderam expressivamente às combinações fatoriais de nitrogênio e potássio. O NG variou de 161 grãos (T11) a 427 grãos (T4), enquanto o PG oscilou de 25 g (T11) a 90 g (T4), evidenciando relação direta com a disponibilidade nutricional (Figura 1). O tratamento T4 (70–56 kg ha⁻¹) apresentou os maiores valores simultâneos de NG (427) e PG (90 g), indicando máxima eficiência reprodutiva. Em contraste, a ausência de fertilização (T11; 0–0 kg ha⁻¹) resultou nos menores valores de NG (161) e PG (25 g), demonstrando limitação severa no enchimento de grãos (Figura 1). Tratamentos intermediários, como T6 (5–24 kg ha⁻¹) e T7 (95–56 kg ha⁻¹), exibiram altos NG (329 e 385) e PG (74 e 79 g), sugerindo que níveis elevados de N associados a K adequado favorecem a produtividade. Assim, a interação N×K promove incremento consistente na formação e massa dos grãos.

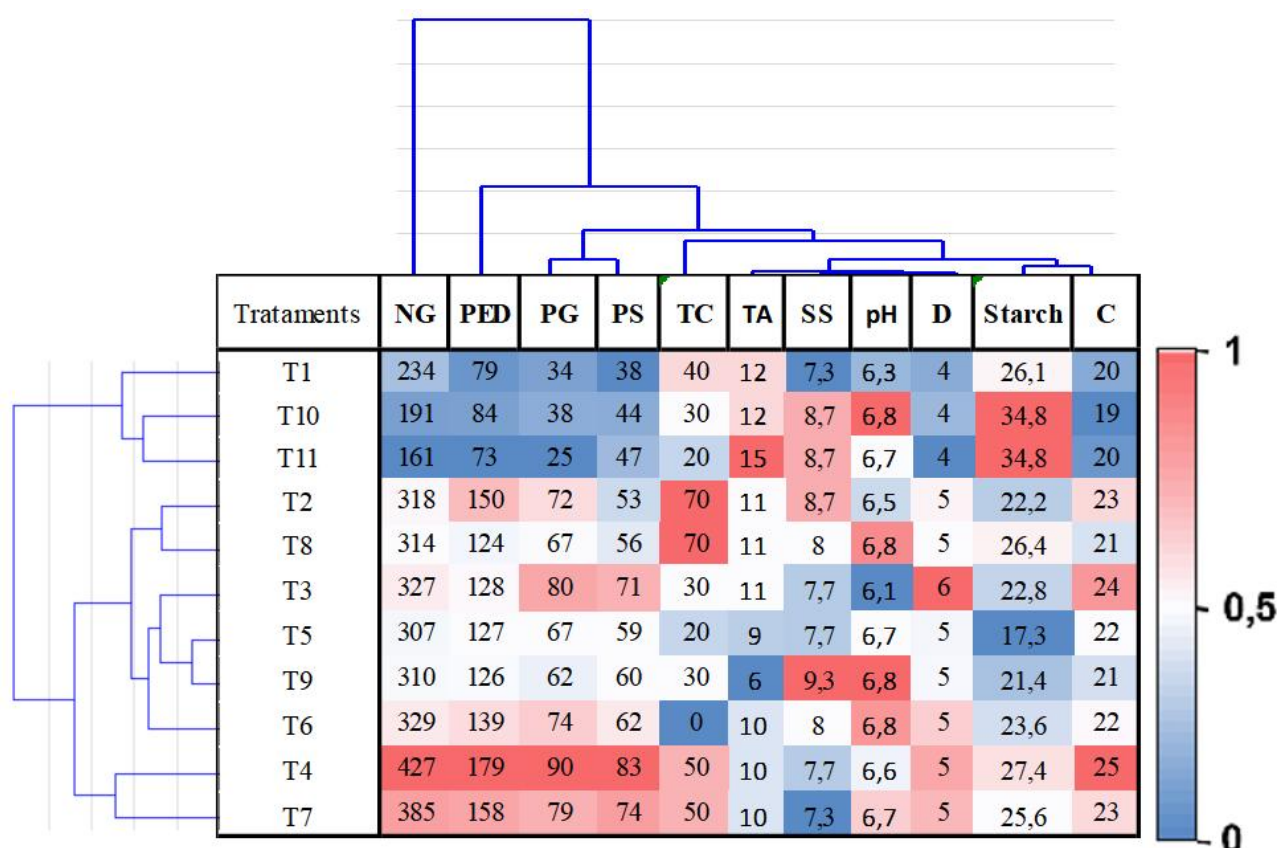


Figura 1: Mapa de calor e dendogramas dos parâmetros morfológicos (comprimento (C) e diâmetro (D) da espiga, peso da espiga despalhada (PED), peso do sabugo (PS), número de grãos (NG) e peso dos grãos (PG)) e físico-químicos (pH, acidez total (TA, mg/100g), sólidos solúveis (SS, °Brix), amido (Starch, g/100 g) e carotenoides totais (TC, mg/Kg.)) do milho (*Zea mays* L.) cultivado sob tratametro N×P usando a Matriz Plan Puebla III para as doses de Nitrogênio (Uréia) e Potássio (KCl).

3.2. Influencia de nitrogênio e potássio nos parâmetros de qualidade do milho

Os valores de pH e acidez total (TA) revelaram variações moderadas entre os tratamentos, refletindo ajustes metabólicos associados à nutrição mineral. O pH variou de 6,1 (T3) a 6,8 (T8, T9 e T10), enquanto a TA oscilou de 6 (T9) a 15 (T11), indicando equilíbrio ácido-base influenciado

pelas doses de N e K (Figura 1). Tratamentos com maiores doses de nitrogênio, como T3 (70–24 kg ha⁻¹), apresentaram menor pH (6,1) e TA moderada (11), sugerindo maior acúmulo de compostos orgânicos ácidos (Figura 1). Em contraste, T11 (0–0 kg ha⁻¹) exibiu maior TA (15) e pH intermediário (6,7), indicando perfil ácido associado à menor atividade metabólica. O tratamento T9 (70–76 kg ha⁻¹) destacou-se pelo menor valor de TA (6) e pH elevado (6,8), evidenciando efeito tampão do potássio (Figura 1). Assim, a interação N×K modula o equilíbrio ácido das espigas, influenciando características químicas relevantes.

Os sólidos solúveis (SS) mostraram variação significativa entre os tratamentos, indicando influência direta do manejo nutricional sobre o acúmulo de açúcares. Os valores oscilaram de 7,3 °Brix (T1 e T7) a 9,3 °Brix (T9), evidenciando incremento com doses equilibradas de N e K (Figura 1). O tratamento T9 (70–76 kg ha⁻¹) apresentou o maior teor de SS (9,3 °Brix), sugerindo maior síntese e translocação de carboidratos para os grãos (Figura 1). Em contraste, T1 (30–24 kg ha⁻¹) e T7 (95–56 kg ha⁻¹) apresentaram menores valores (7,3 °Brix), indicando que o excesso ou a deficiência relativa de nutrientes pode reduzir a concentração de açúcares solúveis (Figura 1). Tratamentos intermediários, como T5 (50–40 kg ha⁻¹), exibiram SS de 7,7 °Brix, confirmando resposta gradativa ao suprimento mineral (Figura 1). Portanto, o equilíbrio nutricional N×K favorece maior acúmulo de sólidos solúveis, refletindo melhor qualidade fisiológica dos grãos.

O teor de amido apresentou variação expressiva entre os tratamentos, refletindo o impacto da nutrição mineral no metabolismo de reserva dos grãos. Os valores oscilaram de 17,3% (T5) a 34,8% (T10 e T11), indicando respostas contrastantes às doses de N e K (Figura 1). Os tratamentos T10 (5–4 kg ha⁻¹) e T11 (0–0 kg ha⁻¹) exibiram os maiores teores de amido (34,8%), sugerindo maior deposição de carboidratos estruturais sob condições de menor crescimento vegetativo (Figura 1). Em contraste, T5 (50–40 kg ha⁻¹) apresentou o menor valor (17,3%), indicando possível diluição do amido devido ao maior acúmulo de biomassa e proteínas (Figura 1). Tratamentos produtivos, como T4 (70–56 kg ha⁻¹), mostraram teor intermediário (27,4%), evidenciando equilíbrio entre crescimento e armazenamento. Assim, a disponibilidade de N e K regula a alocação de fotoassimilados, modulando a síntese e o acúmulo de amido nos grãos.

Os carotenoides totais (TC) apresentaram ampla variação entre os tratamentos, evidenciando sensibilidade do metabolismo pigmentário à interação N×K. Os valores oscilaram de 0 mg kg⁻¹ (T6) a 70 mg kg⁻¹ (T2 e T8), indicando forte resposta às doses combinadas de nutrientes (Figura 1). Os tratamentos T2 (30–56 kg ha⁻¹) e T8 (30–4 kg ha⁻¹) registraram os maiores teores (70 mg kg⁻¹), sugerindo que níveis moderados de nitrogênio associados a potássio favorecem a biossíntese de pigmentos antioxidantes (Figura 1). Em contraste, T6 (5–24 kg ha⁻¹) apresentou ausência de carotenoides detectáveis (0 mg kg⁻¹), indicando limitação metabólica sob baixa disponibilidade de N (Figura 1). Tratamentos com doses elevadas, como T4 e T7 (50 mg kg⁻¹), exibiram valores intermediários, evidenciando resposta não linear (Figura 1). Portanto, a adequada interação entre nitrogênio e potássio regula a síntese de carotenoides, impactando a qualidade nutricional dos grãos.

3.3. Interações multivariadas entre tratamentos e atributos agronômicos e qualitativos das espigas sob adubação nitrogenada e potássica

A análise do dendrograma referente aos tratamentos (T1–T11) revelou a formação de grupos distintos em função das combinações fatoriais de nitrogênio e potássio, refletindo padrões semelhantes de resposta agrônômica e físico-química das espigas. Observou-se que T10 e T11 agruparam-se inicialmente, indicando elevada similaridade associada às menores doses de N e K, caracterizadas por menores valores de NG, PG e PED e maiores teores de amido (Figura 1). Em seguida, T1 aproximou-se desse grupo, formando um subcluster relacionado a baixos níveis nutricionais e menor desempenho produtivo (Figura 1). Outro agrupamento relevante foi composto por T3, T5, T6 e T9, evidenciando respostas intermediárias, com valores moderados de massa e

sólidos solúveis (Figura 1). Por sua vez, T4 e T7 constituíram um cluster separado, associado aos maiores valores de NG, PG e PED, indicando maior eficiência produtiva sob doses elevadas de nutrientes (Figura 1). Assim, o dendrograma demonstra que a interação N×K determina agrupamentos coerentes com o desempenho agrônomo dos tratamentos.

O dendrograma das variáveis avaliadas evidenciou interações claras entre atributos morfológicos, produtivos e químicos das espigas de milho, indicando correlações estruturais entre os parâmetros mensurados. Observou-se a formação de um cluster envolvendo NG, PG, PED e PS, demonstrando forte associação entre número de grãos, massa de grãos e componentes estruturais da espiga, o que reflete a interdependência entre produtividade e biomassa reprodutiva (Figura 1). Em paralelo, comprimento (C) e diâmetro (D) agruparam-se proximamente, sugerindo que o crescimento longitudinal e radial da espiga ocorre de forma integrada (Figura 1). Outro agrupamento relevante incluiu SS, pH e TA, evidenciando relação entre atributos químicos e metabólicos do grão (Figura 1). O amido (Starch) formou associação mais próxima aos parâmetros produtivos, indicando sua ligação ao acúmulo de reservas energéticas (Figura 1). Os carotenoides totais (TC) mostraram posicionamento intermediário, refletindo interação moderada com características produtivas e químicas (Figura 1). Portanto, os dendrogramas confirmam a interdependência funcional entre estrutura, composição e produtividade.

A interpretação conjunta dos dendrogramas de tratamentos e variáveis evidencia que as combinações fatoriais de N e K modulam simultaneamente atributos morfológicos, produtivos e químicos das espigas, definindo perfis tecnológicos distintos. Tratamentos com maiores doses de nutrientes, como T4 e T7, associaram-se ao cluster de alta produtividade, caracterizado por elevados NG, PG e PED, além de comprimento e diâmetro superiores, indicando maior vigor reprodutivo (Figura 1). Em contraste, tratamentos com menores doses, como T10 e T11, aproximaram-se de variáveis associadas a maior teor de amido e menor massa de espiga, evidenciando limitação nutricional e priorização do acúmulo de reservas (Figura 1). Os tratamentos intermediários distribuíram-se entre esses extremos, refletindo respostas graduais à interação N×K (Figura 1). Adicionalmente, a proximidade entre variáveis químicas (SS, pH e TA) reforça o impacto nutricional sobre o metabolismo do grão (Figura 1). Em resumo, os dendrogramas demonstram que o planejamento fatorial estruturou claramente grupos de desempenho, evidenciando a influência determinante da nutrição mineral na qualidade e produtividade das espigas.

3.4. Análise de Componentes Principais para Discriminação dos Tratamentos e Parâmetros de Qualidade em Espigas de Milho

A análise de componentes principais (PCA) evidenciou a distribuição multivariada dos tratamentos (T1–T11) em função das combinações fatoriais de nitrogênio e potássio, demonstrando diferenças estruturais relevantes no desempenho agrônomo e químico das espigas (Figura 2). PC1 e PC2 explicaram 57% e 15% da variância total, respectivamente, totalizando 72% da variabilidade, o que indica adequada representação dos dados bidimensionais (Figura 2). PC1 separou claramente os tratamentos T10, T11 e T6, localizados no quadrante positivo, associados a menores níveis nutricionais, dos tratamentos T2 e T3, posicionados no quadrante negativo e relacionados a respostas intermediárias (Figura 2A). Por sua vez, PC2 distinguiu T8 e T9, com maiores valores positivos, de T1 e T6, localizados na região negativa, sugerindo contrastes nas respostas morfofisiológicas (Figura 2A). O tratamento T4 ocupou posição próxima ao centro, indicando perfil intermediário entre produtividade e qualidade (Figura 2A). PCA demonstrou que as doses fatoriais de N e K geraram gradientes consistentes de resposta entre os tratamentos.

A análise dos loadings revelou a contribuição relativa das variáveis agrônomicas e físico-químicas para a separação dos tratamentos ao longo dos eixos principais (Figura 2B). Observou-se que PC1 foi positivamente associado a PED, PG, NG, PS e comprimento da espiga (C), indicando que este

eixo representa o gradiente produtivo, enquanto valores negativos de PC1 foram relacionados a amido e acidez total (TA), refletindo características de reserva e metabolismo ácido (Figura 2B). PC2 apresentou associação positiva com pH e sólidos solúveis (SS), evidenciando relação com atributos químicos de qualidade, enquanto valores negativos foram relacionados aos carotenoides totais (TC) e TA, indicando influência metabólica específica (Figura 2B). Tratamentos posicionados no quadrante superior direito, como T8 e T9, apresentaram maior relação com pH e SS, enquanto aqueles no quadrante inferior direito, como T6 e T11, estiveram mais associados ao amido e TA (Figura 2B). PCA evidenciou que produtividade, composição química e reservas energéticas respondem de forma integrada às combinações de nitrogênio e potássio.

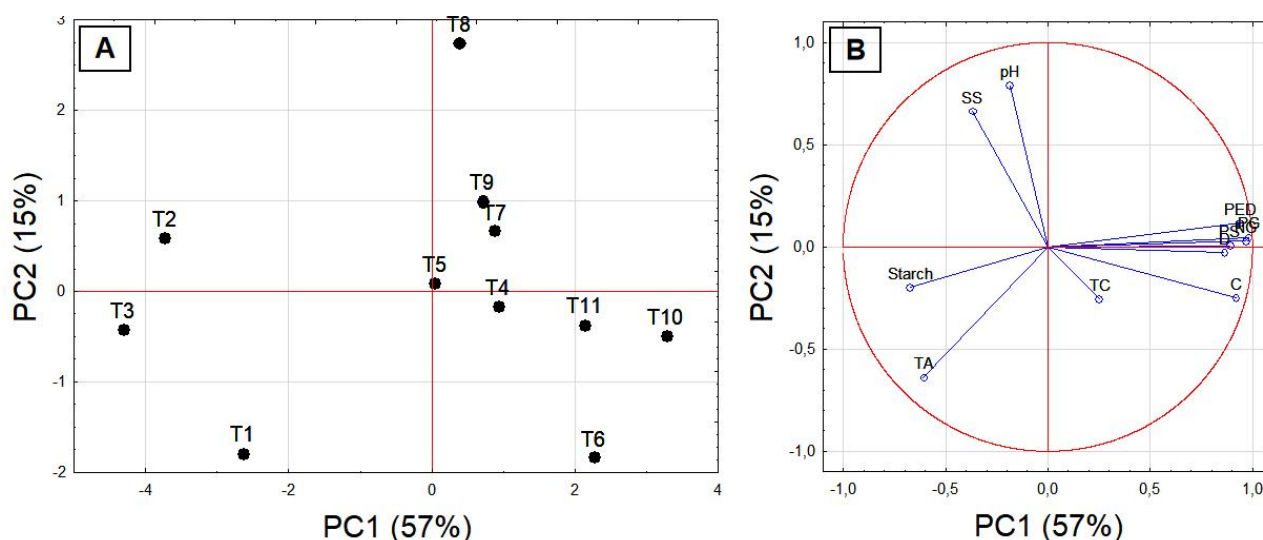


Figura 2: (a) PCA score plot demonstrando variação dos parâmetros morfológicos e físico-químicos do milho (*Zea mays* L.) cultivado sob tratamento N×P usando a Matriz Plan Puebla III para as doses de Nitrogênio (Uréia) e Potássio (KCl); e (b) PCA loading plot demonstrando variação dos parâmetros morfológicos e físico-químicos do milho (*Zea mays* L.) cultivado sob tratamento N×P usando a Matriz Plan Puebla III para as doses de Nitrogênio (Uréia) e Potássio (KCl). Os parâmetros avaliados incluem morfológicos (comprimento (C) e diâmetro (D) da espiga, peso da espiga despilhada (PED), peso do sabugo (PS), número de grãos (NG) e peso dos grãos (PG)) e físico-químicos (pH, acidez total (TA, mg/100g), sólidos solúveis (SS, °Brix), amido (Starch, g/100 g) e carotenoides totais (TC, mg/Kg)).

3.5. Correlação de Pearson entre Atributos Físicos e Parâmetros Físico-Químicos das Espigas

A matriz de correlação evidencia fortes associações entre os atributos físicos das espigas e os componentes produtivos, indicando relações estruturais consistentes entre os tratamentos. O comprimento (C) apresenta correlações positivas com diâmetro (D), peso da espiga despilhada (PED), peso do sabugo (PS), número de grãos (NG) e peso dos grãos (PG), com valores de 0,78; 0,88; 0,88; 0,87 e 0,90, respectivamente (Tabela 3). Por outro lado, D correlaciona-se positivamente com PED (0,69), PS (0,74), NG (0,72) e PG (0,85) (Tabela 3). Observa-se ainda que PED possui correlações positivas com PS (0,87), NG (0,96) e PG (0,95), e PS apresenta associação positiva com NG (0,88) e PG (0,88) (Tabela 3). O número de grãos (NG) mostra forte correlação positiva com PG (0,96), evidenciando que o aumento do número de grãos está diretamente relacionado ao incremento do peso final (Tabela 3). Esses resultados indicam que atributos morfológicos da espiga são determinantes para o desempenho produtivo, refletindo interdependência estrutural entre os

componentes agronômicos avaliados.

No conjunto dos parâmetros químicos, observam-se correlações contrastantes entre composição e variáveis produtivas, revelando interações bioquímicas relevantes para a qualidade dos grãos. O amido (Starch) apresenta correlação positiva com a acidez total (TA) (0,72), enquanto mostra correlações negativas com diâmetro (D) (-0,67) e peso dos grãos (PG) (-0,60), indicando que maiores teores de amido estão associados a reduções no desenvolvimento físico das espigas (Tabela 3). A acidez total (TA) apresenta correlação negativa com o número de grãos (NG) (-0,60), sugerindo que maiores níveis de acidez podem limitar a formação de grãos (Tabela 3). Essas associações evidenciam que variáveis químicas modulam a expressão produtiva, possivelmente refletindo alterações metabólicas na alocação de carbono (Tabela 3). Portanto, o equilíbrio entre acidez e acúmulo de amido exerce papel central na determinação simultânea da qualidade físico-química e do rendimento das espigas de milho.

Tabela 3: Tabela de person (n) para parâmetros morfológicos e físico-químicos do milho (*Zea mays* L.) cultivado sob tratameto N×P usando a Matriz Plan Puebla III para as doses de Nitrogênio (Uréia) e Potássio (KCl).

	C	D	PED	PS	NG	PG	pH	TA	SS	Starch	TC
C	1,00										
D	0,78	1,00									
PED	0,88	0,69	1,00								
PS	0,88	0,74	0,87	1,00							
NG	0,87	0,72	0,96	0,88	1,00						
PG	0,90	0,85	0,95	0,88	0,96	1,00					
pH	-0,37	-0,33	0,04	-0,05	-0,06	-0,09	1,00				
TA	-0,31	-0,51	-0,55	-0,44	-0,60	-0,57	-0,22	1,00			
SS	-0,39	-0,20	-0,25	-0,32	-0,41	-0,32	0,42	-0,12	1,00		
Starch	-0,48	-0,67	-0,52	-0,34	-0,57	-0,60	0,20	0,72	0,21	1,00	
TC	0,24	0,11	0,33	0,09	0,31	0,25	-0,13	0,02	-0,08	-0,02	1,00

Os parâmetros avaliados incluem morfológicos (comprimento (C) e diâmetro (D) da espiga, peso da espiga despalhada (PED), peso do sabugo (PS), número de grãos (NG) e peso dos grãos (PG)) e físico-químicos (pH, acidez total (TA, mg/100g), sólidos solúveis (SS, °Brix), amido (Starch, g/100 g) e carotenoides totais (TC, mg/Kg)).

4. Discussão

A resposta morfológica das espigas ao suprimento de nitrogênio (N) e potássio (K) observada neste estudo corrobora o papel central desses nutrientes na expansão celular e na formação de estruturas reprodutivas em gramíneas (Ye et al., 2022). O aumento do comprimento e diâmetro das espigas sob doses intermediárias e elevadas de N e K sugere maior atividade meristemática e eficiência fotossintética, favorecendo o crescimento estrutural e o enchimento dos tecidos reprodutivos. O nitrogênio atua diretamente na síntese de proteínas e clorofila, promovendo maior área foliar e assimilação de carbono, enquanto o potássio regula o equilíbrio osmótico e o transporte de fotoassimilados para os órgãos de reserva, intensificando a expansão radial e longitudinal das espigas (Taiz et al., 2017; Hawkesford et al., 2012). O tratamento T4 apresentou maior tamanho de espiga, reforçando a hipótese de que o adequado balanço N×K maximiza a eficiência fisiológica da

planta. Portanto, a nutrição mineral equilibrada emerge como fator determinante para o desenvolvimento morfológico superior e maior potencial produtivo das espigas.

A variação expressiva no peso da espiga despalhada, do sabugo e dos grãos evidencia que a disponibilidade de N e K regula a alocação de biomassa entre componentes estruturais e reprodutivos. O maior acúmulo de massa observado em T4 indica que o nitrogênio favorece a síntese de compostos nitrogenados e enzimas associadas ao enchimento de grãos, enquanto o potássio intensifica o transporte de açúcares e a atividade enzimática relacionada à formação de amido e proteínas (Marschner, 2012; Fageria, 2014). Em contraste, a limitação nutricional reduziu drasticamente o número e o peso dos grãos, confirmando que a deficiência de N compromete a divisão celular e a formação de estruturas reprodutivas, enquanto a baixa disponibilidade de K prejudica o balanço hídrico e o transporte de assimilados. Esse comportamento reforça que a interação sinérgica entre N e K aumenta a eficiência de uso de nutrientes e a produtividade agrícola. Assim, doses adequadas desses macronutrientes potencializam simultaneamente biomassa reprodutiva e rendimento de grãos.

As modificações nos parâmetros químicos das espigas, como pH, acidez total e sólidos solúveis, refletem ajustes metabólicos associados à nutrição nitrogenada e potássica, influenciando diretamente a qualidade fisiológica dos grãos. O efeito tamponante do potássio, observado em tratamentos com maiores doses, está associado à regulação do equilíbrio ácido-base celular e à ativação de enzimas relacionadas ao metabolismo de carboidratos e ácidos orgânicos (Ye et al., 2022; Marschner, 2012). Simultaneamente, o nitrogênio influencia a síntese de aminoácidos e compostos orgânicos, podendo reduzir o pH pela maior produção de metabólitos ácidos (Ye et al., 2022). O aumento dos sólidos solúveis sob equilíbrio nutricional confirma que a disponibilidade adequada de N e K intensifica a fotossíntese e a translocação de açúcares para os grãos, resultando em maior concentração de compostos solúveis e melhor qualidade tecnológica. Portanto, a interação N×K não apenas aumenta a produtividade, mas também modula o perfil metabólico e químico dos grãos, refletindo melhorias na qualidade final do milho.

O acúmulo de amido e carotenoides totais demonstra que a nutrição mineral regula a alocação de carbono e o metabolismo de pigmentos antioxidantes nos grãos de milho. Maiores teores de amido em condições de baixa disponibilidade de N e K indicam priorização do armazenamento de reservas estruturais quando o crescimento vegetativo é limitado, fenômeno amplamente descrito para culturas cerealíferas sob estresse nutricional (Taiz et al., 2017; Hawkesford et al., 2012). Por outro lado, níveis moderados de nitrogênio associados ao potássio favoreceram a biossíntese de carotenoides, compostos dependentes da atividade fotossintética e do balanço redox celular. O potássio, ao regular a abertura estomática e o transporte de assimilados, contribui indiretamente para a síntese de pigmentos e compostos antioxidantes, elevando o valor nutricional dos grãos (Ye et al., 2022; Silva & de Souza, 2020; Scott & Eldridge, 2005). Dessa forma, a interação entre nitrogênio e potássio define o balanço entre crescimento, reserva energética e qualidade nutricional, sendo determinante para a obtenção de espigas com elevado desempenho produtivo e tecnológico.

Os resultados demonstram, de forma integrada, que a interação entre nitrogênio e potássio constitui o principal determinante da produtividade e qualidade das espigas de milho, revelando novidades relevantes quanto à modulação simultânea de atributos morfológicos, produtivos e químicos. As maiores respostas em comprimento, diâmetro, massa de espiga, número e peso de grãos sob doses equilibradas de N×K evidenciam que a nutrição mineral regula tanto a expansão estrutural quanto a eficiência reprodutiva. A importância científica reside na demonstração multivariada, por dendrogramas, PCA e correlação de Pearson, de que produtividade, reservas energéticas e parâmetros químicos respondem de forma interdependente ao manejo nutricional, configurando perfis fisiológicos distintos. Do ponto de vista industrial, os achados indicam que o ajuste fino das doses de N e K pode otimizar simultaneamente rendimento, teor de sólidos solúveis e carotenoides, atributos essenciais para processamento e qualidade nutricional dos grãos. Como aplicações práticas,

destacam-se a recomendação de doses balanceadas para maximizar produtividade com qualidade tecnológica e o uso de análises multivariadas como ferramenta decisória. Contudo, limitações incluem a avaliação em um único ciclo e ambiente experimental, sem considerar variabilidade genotípica e edafoclimática. Estudos futuros devem explorar diferentes cultivares, condições de solo e validação em escala de campo.

5. Conclusão

A presente pesquisa evidenciou que a interação entre nitrogênio e potássio modula de maneira decisiva o desempenho agrônomo e a qualidade físico-química das espigas de milho, configurando um gradiente consistente de respostas produtivas e metabólicas. Doses equilibradas de N×K promoveram maiores comprimentos e diâmetros de espigas, maior massa de espiga, número e peso de grãos, indicando superior eficiência reprodutiva. Adicionalmente, o manejo nutricional influenciou parâmetros químicos, como pH, acidez total, sólidos solúveis, amido e carotenoides, demonstrando que a nutrição mineral regula simultaneamente crescimento, alocação de reservas e qualidade nutricional. As análises multivariadas confirmaram que atributos morfológicos, produtivos e químicos são estruturalmente interdependentes, sendo organizados em clusters coerentes com os níveis de adubação. Como novidade científica, o estudo demonstra que a combinação balanceada de N e K define perfis tecnológicos distintos de espigas, integrando produtividade e qualidade em um único modelo interpretativo. Esses achados reforçam a relevância do manejo nutricional otimizado para maximizar o desempenho agrônomo e a qualidade dos grãos de milho.

Referências

- Abdi, H., & Williams, L. (2010). Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4), 433–459.
- Amado, T.J.C.; Mielniczuk, J.; Aita, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p. 241-248, 2002.
- Anjum, M. F., Tasadduq, I., & Al-Sultan, K. (1997). Response surface methodology: A neural network approach. *European Journal of Operational Research*, 101, 65–73.
- Brazil (2008) Métodos Físico-Químicos Para análises de alimentos. Ministério Da Saúde. Instituto Adolfo Lutz 2008(5):205–260
- Cantarella, H.; Duarte, A. P. Manejo da fertilidade do solo para a cultura do milho. In: Galvão, J. C. C.; Miranda, G. V. (Eds.). *Tecnologia de produção de milho*. Viçosa: UFV, 2004. p. 139-182.
- Fageria, N. K. (2014). *Nitrogen Management in Crop Production*. Boca Raton: CRC Press.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager Møller, I., & White, P. (2012). Functions of macronutrients. In P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed., pp. 135–189). London: Academic Press.
- Higby, W. A Simplified Method for Determination of Some Aspects of the Carotenoid Distribution in Natural and Carotene-Fortified Orange Juice. *Journal of Food Science* 27(1):42-49. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1962.tb00055.x>
- Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). London: Academic Press.
- Martin, T.N.; Pavinato, P.S.; Silva, M.R. Ortiz, S.; Bertonceli, P. Fluxo de nutrientes em ecossistemas de produção de forragens conservadas. In: *Simpósio: Produção e Utilização de Forragens Conservadas*, 4, 2011, Maringá. *Anais Maringá: Sthampa*, 2011. p.173-220.
- Myers, R., Montgomery, D., & Gunst, R. (2009). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. Wiley, 38(3), 705.
- SANTOS CAF, Senalik D & Simon PW (2005) Path analysis suggests phytoeneaccumulation is the key step limiting the carotenoidpathway in white carrot roots. *Geneticsand Molecular Biology*, 28:287-293.
- Scott, C. E.; Eldridge, A. L. Comparison of carotenoid content in fresh, frozen and canned corn. *Journal of Food Composition and Analysis*, San Diego, v. 18, p. 551-559, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2004.04.001>
- Silva, H. de S., & de Souza, A. P. (2020). Nitrogen fertilization recommendation for corn cultivated under no-tillage. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(11), 762–768. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n11p762-768>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sunderland: Sinauer Associates.
- Ye, J. Y., Tian, W. H., & Jin, C. W. (2022). Nitrogen in plants: from nutrition to the modulation of abiotic stress adaptation. *Stress Biology*, 2(4). <https://doi.org/10.1007/s44154-021-00030-1>