

Eficiência bioeconômica da adubação mineral na cultura do sorgo

Bioeconomic efficiency of mineral fertilization in sorghum crop

Eficiencia bioeconómica de la fertilización mineral en cultivo de sorgo

Recebido: 28/09/2022 | Revisado: 10/10/2022 | Aceitado: 11/10/2022 | Publicado: 15/10/2022

João Pedro Alves de Souza Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0804-115X>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: peualves02@gmail.com

Jose Orlando Nunes da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7622-5095>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: joseorlando.agro@gmail.com

Kaique Renan da Silva Salvador

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6119-2865>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: kaiquersalvador@outlook.com

Thamila Menezes Guerra

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3595-6013>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: thamilamenezes.ufpe@gmail.com

Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0804-115X>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: alexandremrfj@gmail.com

Nágila Sabrina Guedes da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4006-1652>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: nagilasabrinaguedes@gmail.com

Erison Martins Amaral

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5627-695X>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: erison.m.a13@hotmail.com

Renan Matheus Cordeiro Leite

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8454-8660>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: renanmatheuscl@gmail.com

Rhaiana Oliveira de Aviz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4462-4339>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: rhaianaoliveiradeaviz@gmail.com

Maurício Luiz de Mello Vieira Leite

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4241-241X>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: nopalea21@yahoo.com.br

Resumo

As mudanças climáticas apresentam grandes desafios para a gestão agrícola em relação às estratégias de adaptação, uso de fertilizantes e culturas tolerantes. Desta forma, objetivou-se com essa revisão investigar as premissas da adubação mineral no sorgo e apresentar a eficiência bioeconômica das respostas dessa cultura quando manejada com o uso de adubação mineral. Para atingir resultados satisfatórios, um dos pré-requisitos que devem ser observados é a aplicação da adubação mineral conforme a exigência nutricional da cultura. No sorgo, essa exigência varia de acordo com a produtividade da cultura em cada situação de cultivo. A extração de nutrientes do solo segue um aumento linear de acordo com o aumento da produtividade, indicando que quanto mais a cultura está condicionada a altos níveis de produtividade, maior será a retirada de nutrientes do sistema. Os nutrientes extraídos em maior quantidade pela cultura são nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, e sua ordem de extração e acúmulo de macro e micronutrientes é: $K > N > Ca > Mg > S > P > Fe > Zn > Mn > Cu$. Ainda são escassas as pesquisas que descrevam o melhor custo-benefício da utilização dos nutrientes a fim de potencializar o aporte forrageiro. Portanto, recomenda-se a realização de pesquisas mais específicas voltadas para a eficiência bioeconômica da adubação mineral no sorgo em diferentes sistemas de produção, a fim de fornecer subsídios para a melhoria e maximização da produção dessa cultura, e consequentemente, promover o desenvolvimento socioeconômico das regiões envolvidas no cultivo do

sorgo.

Palavras-chave: *Sorghum* spp.; Exigência nutricional; Nutrientes.

Abstract

Climate change posed major agricultural challenges regarding adaptation, fertilizer use and tolerant crops. Thus, the objective of this review was to investigate the assumptions of mineral fertilization in sorghum and to present a bioeconomic efficiency of this culture when managed with the use of mineral fertilization. To achieve satisfactory results, one of the premises that must be followed is a nutritional requirement of mineral fertilization according to the nutritional requirement of the culture. In sorghum, this requirement varies according to the productivity of the crop in each growing situation. A number of soil nutrients follows a linear pattern according to the increase in productivity, indicating that the more the crop is conditioned to high levels of productivity, the greater the withdrawal of nutrients from the system. The most extracted from the culture are phosphorus, nutrients, potentially calcium and magnesium, and their order of obtaining and accumulating macronutrients: $K > N > Ca > Fe > Zn > Mn > N > Ca > Mn > Mn Cu$. There are still few researches that describe the best cost-benefit of the use of nutrients in order to enhance the forage supply. Therefore, it is recommended to carry out more eco-pronomic research designed for the efficiency of mineral fertilization in the production of sorghum in production systems, and consequently, promoting the development of systems. socioeconomic status of the regions involved in sorghum cultivation.

Keywords: *Sorghum* spp.; Nutritional requirement; Nutrients.

Resumen

El cambio climático planteó grandes desafíos agrícolas con respecto a la adaptación, el uso de fertilizantes y los cultivos tolerantes. Así, el objetivo de esta revisión fue investigar los supuestos de la fertilización mineral en sorgo y presentar una eficiencia bioeconómica de este cultivo cuando se maneja con el uso de fertilización mineral. Para lograr resultados satisfactorios, una de las premisas que se debe seguir es un requerimiento nutricional de fertilización mineral acorde al requerimiento nutricional del cultivo. En sorgo, este requerimiento varía de acuerdo a la productividad del cultivo en cada situación de cultivo. Una serie de nutrientes del suelo sigue un patrón lineal de acuerdo con el aumento de la productividad, lo que indica que cuanto más se condiciona el cultivo a altos niveles de productividad, mayor es la extracción de nutrientes del sistema. Los más extraídos del cultivo son fósforo, nutrientes, potencialmente calcio y magnesio, y su orden de obtención y acumulación de macronutrientes: $K > N > Ca > Fe > Zn > Mn > N > Ca > Mn > Mn Cu$. Todavía existen pocas investigaciones que describan el mejor costo-beneficio del uso de nutrientes para mejorar la oferta de forraje. Por lo que se recomienda realizar más investigaciones eco-pronómicas diseñadas para la eficiencia de la fertilización mineral en la producción de sorgo en los sistemas productivos, y en consecuencia, promover el desarrollo de los sistemas. estatus socioeconómico de las regiones involucradas en el cultivo del sorgo.

Palabras clave: *Sorghum* spp.; Requerimiento nutricional; Nutrientes.

1. Introdução

Mundialmente, as mudanças climáticas vêm afetando as atividades agrícolas das mais variadas formas possíveis (Atube et al., 2021; Raulino et al., 2021). Tais alterações causam elevadas reduções na oferta regular de água em todo o globo, atingindo de forma mais severa as regiões áridas e semiáridas (Raulino et al., 2021; Jardim et al., 2021a). O Brasil possui uma das maiores áreas semiáridas do mundo (982,566 km²), com altas temperaturas do ar e precipitação pluvial que varia entre 400 e 800 mm ano⁻¹, indicando ser uma região que necessita de manejos que possam mitigar os impactos causados pela escassez hídrica (Jardim et al., 2021b). Em áreas com baixa disponibilidade hídrica, optar por culturas que sejam adaptadas às condições climáticas é uma forma de mitigação inteligente e viável.

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é uma cultura de extrema importância econômica para as atividades agrícolas e pecuárias presentes em todo o planeta, principalmente em áreas que possuem limitações de disponibilidade hídrica (Asadi; Eshghizade, 2021; Ferrazza et al., 2016; Menezes et al., 2021). Esta gramínea tropical pertencente à família Poaceae, devido a suas características morfofisiológicas e resposta produtiva positiva às condições em ambientes tropicais e semiáridos, surge como ferramenta sustentável na redução dos problemas causados pela seca (Balakrishna et al., 2019; Jardim et al., 2020). Além disso, é potencialmente uma das culturas mais abrangentes e com várias utilidades comerciais, podendo ser destinado para alimentação animal e humana, biocombustíveis, e até para fins medicinais (Amarakoon et al., 2021; Jardim et al., 2021b).

Por ser uma cultura extremamente versátil, práticas como consórcio de plantas, irrigação, uso de cobertura morta e

adubação orgânica e mineral, são conhecidas como medidas que elevam o aporte de biomassa dessa cultura, em regiões com limitações econômicas e agronômicas (Alves et al., 2020; Ferrazza et al., 2016; Jardim et al., 2021c). Dentre as técnicas de manejo cultural, a adubação baseada na exigência nutricional da planta, juntamente com a correção da fertilidade do solo, são fatores considerados cruciais para atingir a excelência da produtividade (Ali et al., 2021; Leite et al., 2022). Com isso, parte-se do princípio da oferta de nutrientes propiciada pelo solo, da necessidade de correção do solo e assim determinar a quantidade a ser aplicada (Asadi; Eshghizade, 2021; Casela et al., 2007).

Em sistemas de produção agrícola, seja por adubação orgânica ou química, os macros e micronutrientes são importantes para o ciclo produtivo do sorgo (Coelho et al., 2017). Dentre eles, o nitrogênio (N) e o potássio (K) se destacam por estarem envolvidos em quase todos os processos fisiológicos e metabólicos da planta. O nitrogênio está ligado diretamente ao crescimento e desenvolvimento vegetal e quando bem manuseado pode proporcionar elevados resultados de produtividade de grãos e fitomassa (Ali et al., 2021). Além do nitrogênio, o potássio se destaca no desenvolvimento vegetal ao longo de todo o ciclo, sua presença estimula o crescimento radicular e aumenta os teores de matéria seca e de nitrogênio total presente em plantas submetidas à restrição hídrica em fases cruciais do desenvolvimento. Sua disponibilidade está atrelada ao conteúdo de água presente no solo, que em condições normais, favorece a difusão do K e o fluxo de massa, melhorando a eficiência da fotossíntese e a atividade enzimática na planta, gerando aumento no crescimento e na produtividade final da cultura (Tittal et al., 2021). Assim como nitrogênio e o potássio, o cálcio (Ca), fósforo (P) e magnésio (Mg) são considerados essenciais para a cultura do sorgo, uma vez que, a extração desses nutrientes do solo pela cultura do sorgo segue um aumento linear paralelo ao aumento da produtividade dessa cultura (Casela et al., 2007; Romeu et al., 2020).

Desta forma, os benefícios atribuídos pelo uso de adubação são positivamente dimensionados através dos resultados obtidos ao longo dos anos. Entretanto, o uso inadequado dessa prática pode ocasionar problemas futuros e perdas econômicas (Ali et al., 2021). Com isso, objetivou-se com essa revisão investigar as premissas da adubação mineral no sorgo e apresentar a eficiência bioeconômica das respostas dessa cultura quando manejada com o uso de adubação mineral.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Exigências nutricionais do sorgo forrageiro

Para atingir resultados satisfatórios, umas das premissas que devem ser seguidas no cultivo do sorgo é a aplicação de adubação mineral conforme a exigência nutricional da cultura (Romeu et al., 2020). A exigência nutricional do sorgo varia de acordo com a produtividade da cultura em cada situação de cultivo. A extração de nutrientes do solo segue um aumento linear de acordo com o aumento da produtividade, indicando que quanto mais a cultura está condicionada a altos níveis de produtividade, maior será a retirada de nutrientes do sistema. Os nutrientes mais extraídos pela cultura são nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, e sua ordem de extração e acúmulo de macro e micronutrientes é: $K > N > Ca > Mg > Enxofre (S) > P > Ferro (Fe) > Zinco (Zn) > Mangânes (Mn) > Cobre (Cu)$ (Albuquerque et al., 2013; Casela et al., 2007).

A ausência desses nutrientes no solo pode acarretar, ao fim do cultivo, problemas graves que afetam a quantidade e qualidade da forragem. A baixa disponibilidade dos nutrientes no solo afeta os processos fisiológicos da planta, promovendo alterações no metabolismo, devido à ausência de nutrientes trabalhando nas células, e provocando deformidades no tecido vegetal. As características dos sintomas de ausência ou excesso de nutrientes na cultura do sorgo são singulares de cada nutriente, porém, os sintomas variam de acordo com as condições ambientais e da cultivar (Santi et al., 2005; Santos et al., 2015).

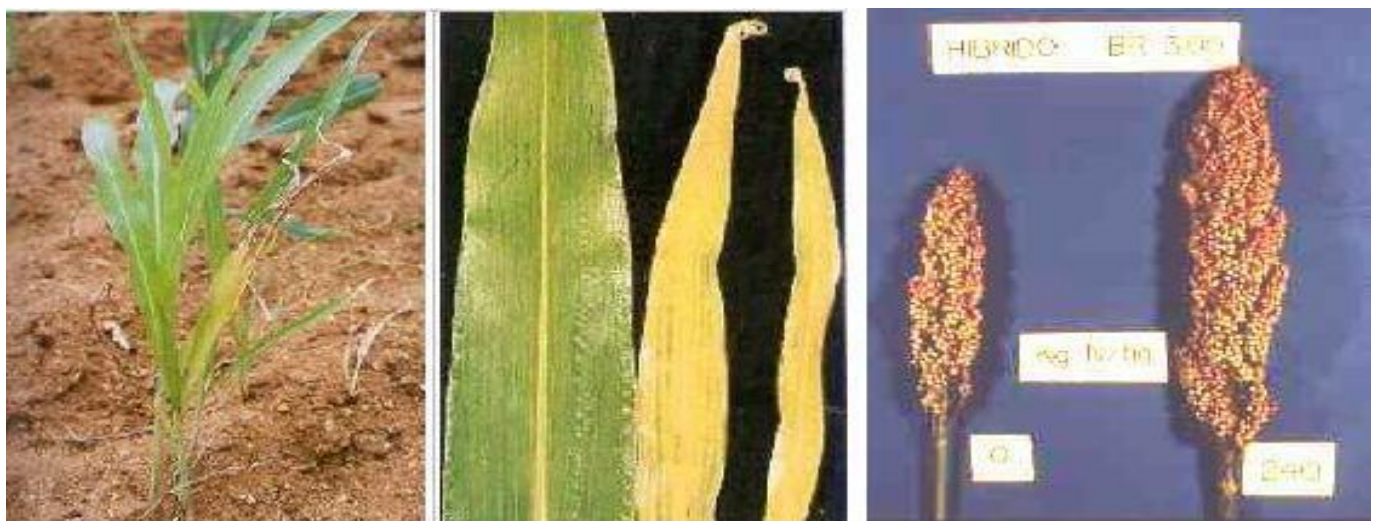
O nitrogênio atua diretamente nos processos de crescimento e desenvolvimento do sorgo, sendo presente na composição das moléculas de clorofilas, aminoácidos, ácidos nucleicos e proteínas das plantas. A resposta da cultura a sua absorção é a mais rápida dentre todos os macronutrientes, sendo o nitrogênio, importante na coloração verde do sorgo, no

crescimento radicular, e consequentemente, essencial na absorção de outros nutrientes pela cultura (Zheng et al., 2015). A ausência de nitrogênio provoca diminuição da produtividade, por isso é tão importante maneja-lo de forma correta. O nitrogênio possui alta mobilidade, devido a sua forma mais abundante encontrada no solo (ânion - NO_3^-), nessa forma, o nitrogênio é mais lixiviado e volatilizado, aumentando a sua perda. Desta forma, torna-se necessário um maior cuidado no momento da aplicação, tanto no semeio quanto na cobertura (Albuquerque et al., 2020). Este elemento também pode ser encontrado na solução do solo nas formas de amônia (NH_3) ou amônio (NH_4^+). Nas plantas, a assimilação do nitrato (NO_3^-) consome 12 ATPs, nesse caso o NO_3^- é convertido em nitrito (NO_2^-), uma forma mais energética, e em seguida, é convertida em NH_4^+ , uma forma muito mais energética (Taiz et al., 2017).

Uma prática muito utilizada visando a fixação biológica de nitrogênio é o consorcio com plantas leguminosas. Pois, além de fornecer o nitrogênio, ainda aumenta, na maioria dos casos, a produtividade das gramíneas (Arf et al., 2018). No caso da amônia, as plantas leguminosas firmam relações simbióticas com as bactérias fixadoras de nitrogênio (e.g., *Rhizobium*) para converter o nitrogênio molecular em amônia, se tornando o primeiro produto estável da fixação natural de nitrogênio, assim, o NH_3 passa pelo processo de protonação para formar o NH_4^+ e todo esse processo de fixação biológica de nitrogênio consome 16 ATPs (Taiz et al., 2017).

Os principais sintomas causados por ausência de nitrogênio são encontrados na parte inferior da folha (Figura 1). Como o nitrogênio está ligado diretamente na produção de grãos, a sua baixa disponibilidade causa diminuição do tamanho da panícula, além de amarelecimento e secamento, causando necrose nas folhas (Casela et al., 2007). Já o excesso de N pode provocar um aumento na suscetibilidade ao ataque de pragas e doenças (Bortoli et al., 2005) e promover a inibição da floração (Sengik, 2003). O uso em excesso de nitrogênio pode acarretar problemas ao sistema ecológico, pois quando aplicado em grandes quantidades esse volume pode ser lixiviado para as camadas mais profundas do solo e emitido para a atmosfera como NH_3 e óxido nitroso (N_2O), ambos considerados prejudiciais ao meio ambiente (Calviño; Messing, 2012).

Figura 1. Sintomas da deficiência de nitrogênio na cultura do sorgo.



Fonte: Casela et al. (2007).

Assim como as bactérias fixadoras de nitrogênio, outras fontes de nitrogênio podem ser encontradas em vários sistemas de produção. Os mais comuns são os minerais de fontes como ureia (45% de N), sendo o mais utilizado, sulfato de amônia (20% de N), nitrato de cálcio (15,5% de N) e nitrato de amônia (33% - $\frac{1}{2} \text{NH}_4^+$ e $\frac{1}{2} \text{NO}_3^-$). Além desses, o nitrogênio ainda pode ser encontrado em fontes de matéria orgânica como restos culturais, esterco bovino, equino e de aves, que possuem

0,6, 0,7 e 1,7% de nitrogênio, respectivamente (Costa et al., 2010; Sengik, 2003).

Assim como o nitrogênio, o potássio exerce funções no crescimento e desenvolvimento das plantas, está envolvido em processos como abertura e fechamento de estômatos, atividades enzimáticas, fotossíntese, absorção de água do solo, formação de amido e síntese proteica (Ahanger; Agarwal, 2017), agindo com mais ênfase na produção de biomassa, principalmente na parte do colmo. Esse nutriente é extremamente importante para o cultivo do sorgo sacarino, chegando a extrair 82% do potássio disponibilizado no solo (Bernardes et al., 2019). Sendo um dos nutrientes mais extraídos pela cultura do sorgo, o potássio é encontrado nas plantas na forma K^+ , desempenhando papel fundamental na regulação do potencial osmótico, além de influenciar na produção de açúcares e amido e na condução desses carboidratos até os órgãos de reserva da planta, sendo fundamental para cultivares com finalidade ligada a produção de etanol (Santos et al., 2015; Taiz et al., 2017).

A deficiência em potássio pode causar colmos com internódios curtos, dilaceração do tecido vegetal e clorose nas folhas (Figura 2) (Casela et al., 2007).

Figura 2. Sintomas da deficiência de potássio na cultura do sorgo.



Fonte: Casela et al. (2007).

O potássio, juntamente com o nitrogênio, são os macronutrientes que o sorgo tem mais exigência e extrai em maior quantidade do solo ao fim do seu ciclo. Entretanto, nutrientes como fósforo, cálcio e magnésio possuem importância na produtividade final da cultura (Casela et al., 2007). É possível associar que, na maioria dos casos, a redução de massa seca, tanto é relacionada à diminuição das áreas foliares, quanto à ausência de nitrogênio, cálcio e magnésio (Albuquerque et al., 2013; Casela et al., 2007). Considerado um dos macronutrientes mais importantes, o fósforo atua nos processos metabólicos das plantas, sendo essencial na respiração, fotossíntese e na transferência de energia das células vegetais (Araújo et al., 2021).

2.2 Adubação mineral: macronutrientes e micronutrientes

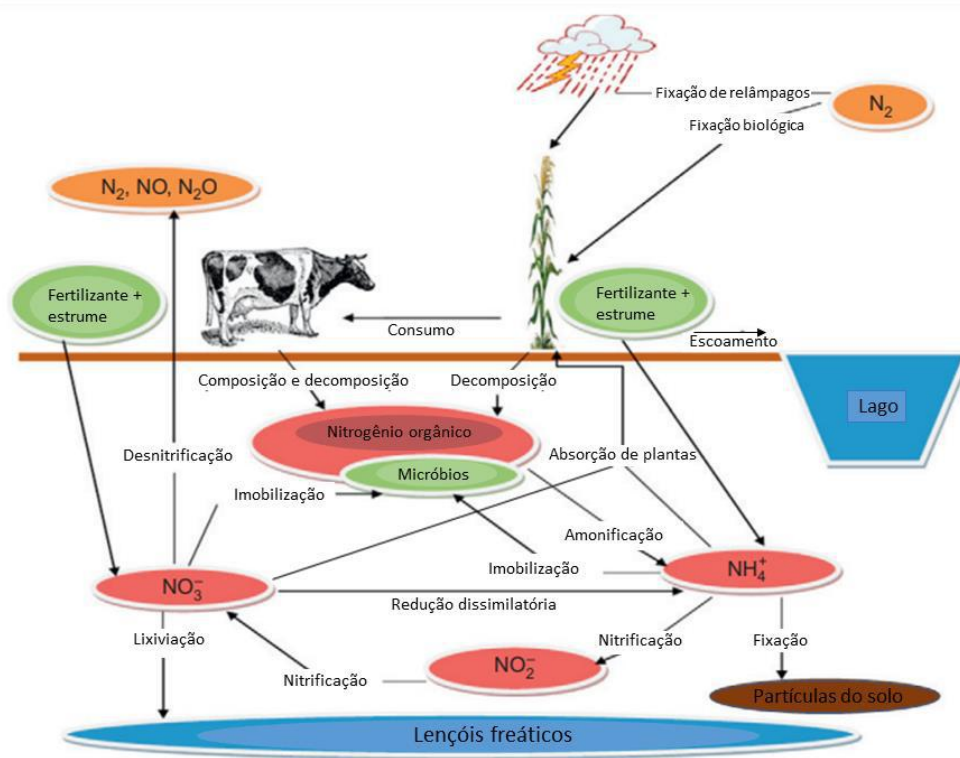
2.2.1 Macronutrientes

2.2.2 Nitrogênio

Conhecido por ser extremamente dinâmico, o nitrogênio possui grande importância nas atividades agrícolas. O seu dinamismo é associado à forma de nitrato com que o nitrogênio é encontrado em maiores concentrações no solo, fazendo-o mais sujeito a lixiviação e volatilização, com isso se faz necessário que o manejo com esse nutriente seja correto e eficiente. Essa perda pode ser atribuída às condições climáticas encontradas em cada região, às altas temperaturas, chuvas de alta intensidade, bem como as características do solo podem influenciar na incorporação do nutriente no solo e sua resposta ao

sistema de cultivo (Figura 3) (Sengik, 2003; St. Luce et al., 2011; Silva et al., 2020).

Figura 3. Ciclo do nitrogênio sob condições ambientais.



Fonte: St. Luce et al. (2011).

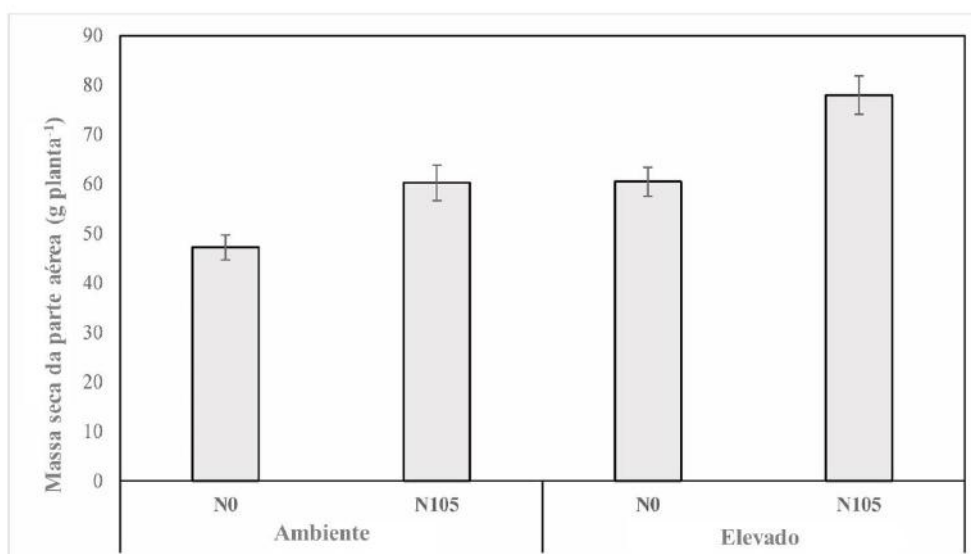
Assim, é necessário planejar a forma de aplicação do nitrogênio. Medidas como parcelamento da aplicação de doses ao longo do tempo e incorporação do nutriente diretamente ao solo podem ajudar a diminuir os desperdícios após a sua inserção ao sistema de cultivo. A eficiência da resposta das plantas ao aumento da dosagem de nitrogênio está ligada a diversos fatores, os edafoclimáticos se destacam nesse sentido, assim como os fatores genéticos específicos de cada cultivar (Sengik, 2003; Silva et al., 2020).

A elevação no rendimento de matéria seca do sorgo é um dos objetivos buscados pelo produtor. O aumento linear em doses crescentes de nitrogênio pode proporcionar um incremento semelhante de matéria seca no sorgo, pois o nitrogênio atua no aumento da biomassa total da cultura, no alongamento do colmo e na proporção de folhas da produção final (Frias et al., 2018). A importância do nitrogênio na cultura do sorgo também pode ser relacionada à presença do nutriente em vários processos fisiológicos, o principal deles é o processo fotossintético. Como o nitrogênio atua na molécula da clorofila, sua ausência diminui a taxa fotossintética, interferindo na composição química da planta. Além disso, o potencial osmótico é influenciado pela presença de nitrogênio, assim como o crescimento radicular, divisão celular, e resistência aos estresses bióticos e abióticos (Asadi; Eshghizade, 2021; Magadlela et al., 2014; Silva et al., 2020).

Em estudo realizado por Asadi e Eshghizade (2021), foi exposto a influência exercida pelo nitrogênio nas respostas fisiológicas do sorgo sob estresse hídrico. Na Figura 4, nota-se o efeito do nitrogênio sobre o peso seco da parte aérea do sorgo em duas condições de atmosfera com diferentes concentrações de CO₂. É possível também observar como o nitrogênio exerceu papel fundamental para que o sorgo pudesse manter bons resultados, elevando o peso seco da parte aérea significativamente nas duas condições atmosféricas de CO₂. A maior elevação no valor do peso seco da parte aérea foi mais expressiva na

condição de maior concentração de CO₂. Segundo Li et al. (2017), em ambientes com maiores concentrações de CO₂ a demanda de nitrogênio pela planta tende a aumentar e a inserção de nitrogênio no sistema de cultivo potencializa os efeitos do CO₂ nos processos de crescimento da planta. Desse modo, a aplicação do nitrogênio maximizou a produtividade do sorgo, através do efeito positivo causado nos processos fotossintéticos da cultura (Ainsworth; Long., 2005; Butterly et al., 2016).

Figura 4. Os efeitos da interação entre a concentração de CO₂ e fertilizante nitrogenado na massa seca da parte aérea (g planta⁻¹) de plantas de sorgo. Ambiente = 390 ± 50 μmol mol⁻¹ CO₂, Elevado = 700 ± 50 μmol mol⁻¹ CO₂. N0 = ausência de N, N105 = 105 mg N kg⁻¹ no solo (Fonte de N - Ureia, 45% N).

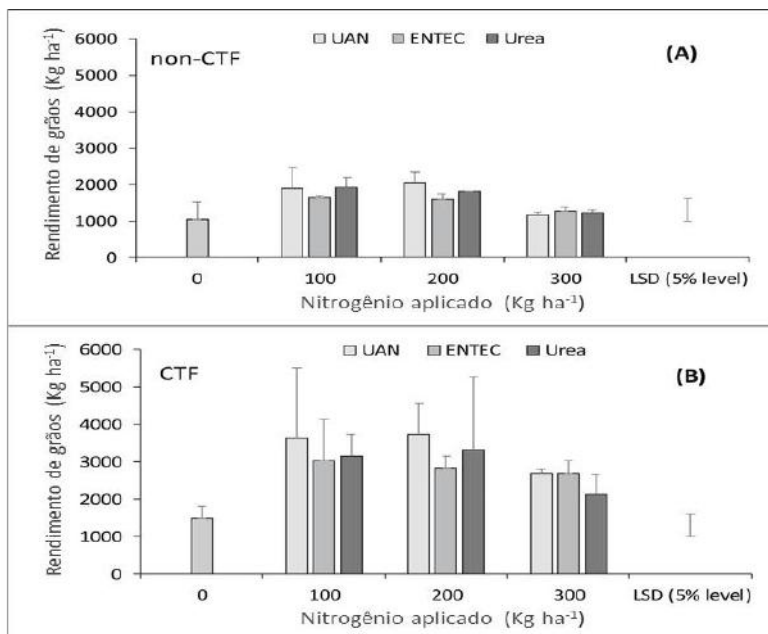


Fonte: Asadi & Eshghizade (2021).

Outro ponto discutido no uso de N para fertilização refere-se às condições que o sistema agrícola (e.g. disponibilidade hídrica, condições climáticas e propriedades físicas do solo) oferece para uma melhor utilização dos nutrientes pela planta. Hussein et al. (2021) estudaram a eficiência da utilização de nitrogênio pelo sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] em função do uso da agricultura de tráfego controlado (CTF). Um sistema de mecanização proposto para que todas as máquinas atuem de forma igualitária na mesma largura de pista reduzindo as áreas de faixas de tráfego permanente. Isso resulta em uma maior produtividade de canteiros sem compactação através da otimização da eficiência do uso de nitrogênio, recursos hídricos naturais e insumos energéticos.

As aplicações de nitrogênio foram obtidas através do uso de ureia, usando taxas entre 0 e 300 kg ha⁻¹ N. Onde foram utilizadas uréia, nitrato de ureia amônio (UAN, 32% N), solução obtida através da junção entre o nitrato de amônio e a ureia, duas das fontes de nitrogênio mais utilizadas no setor agrícola, e ENTEC - ureia tratada com 3,4-fosfato de dimetilpirazol (DMPP, 46% N) (Hussein et al., 2021). Na figura 5, tem-se a produção de grãos em função dos níveis de nitrogênio com o uso ou não do CTF.

Figura 5. Efeito do nitrogênio no rendimento de grãos para dois tratamentos de tráfego representando sistemas não controlado (A, não CTF) e cultivo de tráfego controlado (B, CTF). UAN - nitrato de ureia amônio (32% N), ENTEC - ureia tratada com 3,4-fosfato de dimetilpirazol (DMPP, 46% N), Ureia (45% N).



Fonte: Hussein et al. (2021).

Nesse caso, nota-se que o uso do CTF influenciou no rendimento dos grãos se diferenciando significativamente ($P < 0,05$) do rendimento de grãos das plantas que não tiveram o cultivo de tráfego controlado (não CTF). Os rendimentos dos grãos com base nos níveis de aplicação de N apresentaram taxas ótimas com o uso de nitrato de ureia amônio (UAN, 32% N) no nível de 144 kg ha⁻¹ de N com rendimento de 3428 kg ha⁻¹. Já para não-CTF essa relação foi de 100 kg ha⁻¹ de N com rendimento de 1796 kg ha⁻¹ (Hussein et al., 2021). Essa diferença nos rendimentos é resultado do efeito da compactação do solo causado pelo não uso do CTF, proporcionando dificuldade na absorção de água e, por consequência, diminuindo a eficiência de uso do N (Lipiec & St e pniewski, 1995; Miransari et al., 2009). O estudo deixa claro que a eficiência não está somente ligada as quantidades de fertilizantes aplicadas, mas sim, nas condições oferecidas ao sistema agrícola. Uma vez que, o aumento da dose de N aplicada não influenciou num aumento significativo do rendimento de grãos em solo com não-CTF. Como as taxas de aplicação e o tipo de fertilizante não se diferenciaram estatisticamente, entende-se que a taxa mínima utilizada nos três tipos de fertilizantes já é suficiente para atingir ótimos rendimentos, gerando redução nos custos da produção final (Hussein et al., 2021).

2.2.3 Potássio

O potássio é tido como grande fator de qualidade em alguns produtos agrícolas. O potássio atua na manutenção do teor de açúcar na cana-de-açúcar, como também no tamanho dos frutos cítricos, na resistência e acamamento de gramíneas e transporte e armazenamento de hortaliças. Em plantas forrageiras, o potássio é importante em vários processos, estando relacionado à produção de matéria seca, onde, para cada 1 kg de matéria seca produzida a planta absorve de 15 a 30 gramas de potássio (Ahanger; Agarwal, 2017; Sengik, 2003). Para a cultura do sorgo, o potássio é mais ativo em cultivares de sorgo sacarino, onde a produção de colmo é diretamente influenciada pelo incremento desse nutriente, ficando evidente que o aumento da produção de biomassa (colmo) no sorgo sacarino está associado à ação do potássio (Ahanger et al., 2015;

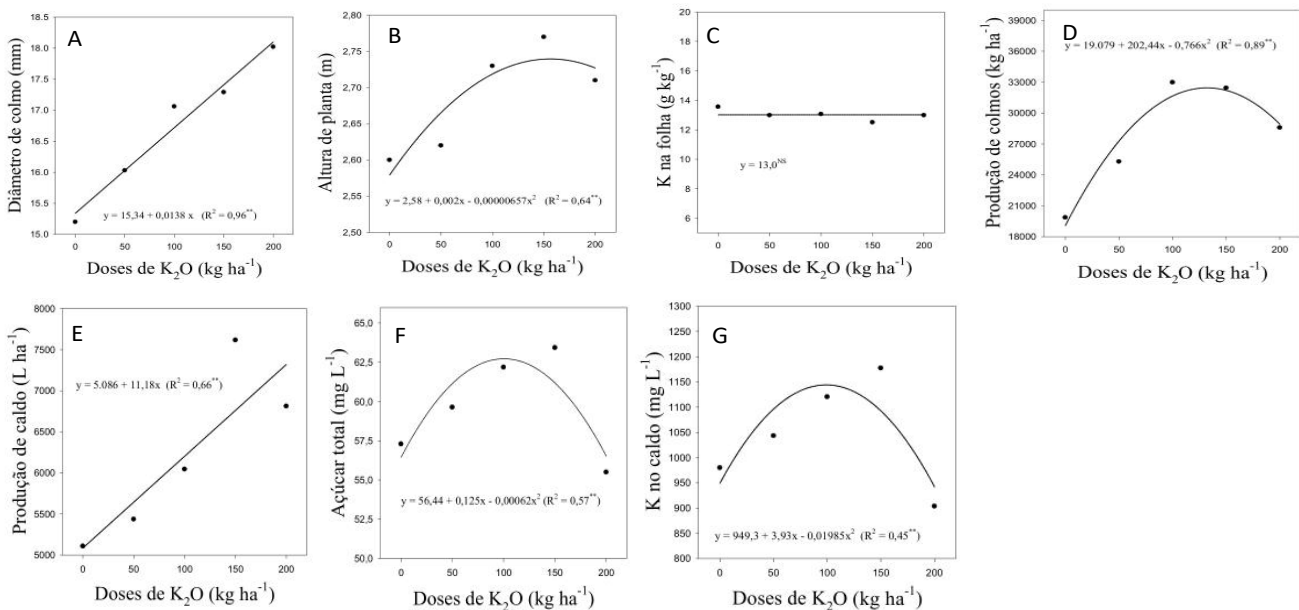
Bernardes et al., 2019).

As plantas forrageiras são comumente cultivadas em regiões de clima árido e semiárido. Essas regiões convivem anualmente com problemas relacionado ao abastecimento hídrico. Com isso, a maioria dos cultivos sofre com os estresses ambientais relacionados à escassez hídrica, afetando os processos fisiológicos das plantas. Assim, a nutrição com potássio ajuda na absorção de água das plantas, uma vez que esse nutriente estimula o crescimento das raízes, tornando a relação água-solo-planta mais eficiente (Tittal et al., 2021).

O uso de potássio auxilia em vários processos importantes para as plantas, porém a disponibilidade desse nutriente é diretamente associada à disponibilidade hídrica do solo, pois o conteúdo de água presente no sistema influencia no fluxo de massa e nas taxas de difusão de potássio no solo. A presença do potássio pode auxiliar a planta quando a mesma estiver sob estresse hídrico, mantendo o conteúdo hídrico nas plantas, o que ajuda na execução dos processos fisiológicos. Essa manutenção de água auxiliada pelo potássio diminui o conteúdo de malondialdeído (MDA), um dos indicadores de estresse oxidativo (e.g., peroxidação lipídica), que tem seu conteúdo aumentado quando a planta está sob estresse hídrico com a ajuda das espécies reativas de oxigênio (Asadi; Eshghizade, 2021; Ataíde et al., 2012; Doussan et al., 2003; Hasanuzzaman et al., 2018; Jatav et al., 2014; Ul-Allah et al., 2020).

A Figura 6 ilustra os resultados obtidos por Bernardes et al. (2019) em estudo realizado com sorgo submetido a diferentes doses de potássio (K_2O – 60% de K). Para as variáveis de crescimento, diâmetro do colmo (Figura 6A) e altura da planta (Figura 6B), foi constatado a influência da aplicação do potássio, onde o diâmetro do colmo apresentou incrementos lineares, conforme a dose de potássio foi elevada. Constatou-se que para cada $1,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O aplicado foi acrescido $0,0138 \text{ mm}$ no diâmetro do colmo, sendo que a maior dose (200 kg ha^{-1}) proporcionou o maior diâmetro ($18,01 \text{ mm}$). A altura da planta também apresentou diferença significativa entre as doses de potássio, onde as maiores alturas ($2,73 \text{ m}$) foram encontradas na dose de 150 kg ha^{-1} de K_2O .

Figura 6. Variáveis de crescimento, produtividade e teores de potássio em função de níveis de potássio aplicados no sorgo.



Fonte: Bernardes et al. (2019).

Resultado semelhante ao encontrado por Fernandes et al. (2014), que desenvolveram estudo voltado para a influência

do espaçamento entre linhas para o cultivo do sorgo. Na ocasião, obtiveram um valor de 17,00 mm para o diâmetro do colmo e 2,80 m para a altura da planta aplicando uma dosagem de 80 kg ha⁻¹ de K₂O. Os resultados descritos por Bernardes et al. (2019) trazem ainda o teor de K presente nas folhas (Figura 6C). Nota-se que não houve diferença significativa entre as doses de potássio aplicadas. Entretanto, é possível notar que as diferentes doses de K influenciaram de maneira acentuada na produção de colmos (Figura 6D), produção de caldo (Figura 6E), teor de açúcares totais (Figura 6F) e teor de K presente no caldo (Figura 6G). O potássio potencializou a produção de colmo. Além disso, a produção do caldo teve um aumento ascendente paralelo ao aumento do fornecimento de K, que consequentemente elevou os teores de potássio no caldo, gerando maiores concentrações de açúcares totais no caldo extraído da planta (Bernardes et al., 2019).

2.2.4 Fósforo

Na cultura do sorgo, o fósforo é quase que totalmente exportado para a produção de grãos. Assim, é preciso planejar antecipadamente, antes da aplicação dos manejos culturais, qual a finalidade do cultivo e assim determinar com precisão qual a melhor forma de incremento desse nutriente (Albuquerque et al., 2013). Em regiões de Cerrado, onde a disponibilidade desse macronutriente é relativamente baixa, se faz necessário o uso de adubação fosfatada, pois, cultivos que se iniciam sem um fornecimento adequado de fósforo podem ter seu desenvolvimento vegetal comprometido. Por isso é tão importante planejar as ações agrícolas associadas à fertilidade do solo, principalmente em relação ao fósforo (Araújo et al., 2021; Sengik, 2003; Casela et al., 2007).

Os sintomas causados por deficiência de fósforo (Figura 7) são descritos como crescimento atrofiado da planta, coloração verde-escura na área foliar, má formação das folhas, necrose, produção de caules delgados, morte de folhas mais velhas e retardamento do desenvolvimento (Casela et al., 2007; Taiz et al., 2017).

Figura 7. Sintomas da deficiência de fósforo na cultura do sorgo.



Fonte: Casela et al. (2007).

2.2.5 Cálcio

O cálcio é extremamente importante nas áreas agrícolas por todo o mundo, muito utilizado na correção de solos que apresentam acidez. O uso de fontes de cálcio ajuda a melhorar a química do solo, diminuindo as concentrações de metais como o Al³⁺, aumentando o crescimento do sistema radicular e a eficiência na absorção de água e do uso de nitrogênio pela cultura

(Duart et al., 2021).

A absorção do cálcio é realizada como íon bivalente (Ca^{++}), sendo responsável pelo armazenamento e translocação de proteínas e carboidratos, além da formação e integridade das membranas da parede celular. Os íons de cálcio ajudam a minimizar a absorção de sódio (Na^+) e aumentam a seletividade da absorção do K^+ do meio externo. Uma vez que, os íons de Na^+ possuem facilidade para romper a membrana plasmática por diferentes maneiras, mesmo possuindo baixa permeabilidade através da bicamada lipídica. Nessas rotas de entrada por qual o Na^+ pode se mover, em várias delas ocorre o transporte do K^+ para as células das raízes, por isso é tão importante regular essa absorção do potássio. A ausência de cálcio no cultivo do sorgo provoca sintomas (Figura 8), como clorose internerval, secamento, amarelecimento e necrose nas folhas jovens e redução do crescimento radicular. O teor nas plantas varia de 3 a 24 g kg^{-1} em função do período de crescimento das mesmas (Casela et al., 2007; Sengik, 2003; Taiz et al., 2017).

Figura 8. Sintomas da deficiência de cálcio na cultura do sorgo.



Fonte: Casela et al. (2007).

Lacerda et al. (2004) analisaram a influência do cálcio no crescimento de plântulas de sorgo submetidos a estresse salino. Usando dois genótipos de sorgo e duas concentrações de Cálcio (0,65 mmol L^{-1} e 2,60 mmol L^{-1} de Ca^{2+}). Na Tabela 1, observa-se a produção de matéria seca tanto da parte aérea quanto do sistema radicular.

Tabela 1. Produção de matéria seca de plântulas de dois genótipos de sorgo, sob duas concentrações de Ca²⁺, submetidos ou não a estresse salino.

Genótipo	Tratamento	Matéria seca ⁽¹⁾			
		Parte aérea		Raiz	
		Ca ²⁺ 0,65 mmol L ⁻¹	Ca ²⁺ 2,60 mmol L ⁻¹	Ca ²⁺ 0,65 mmol L ⁻¹	Ca ²⁺ 2,60 mmol L ⁻¹
G					
Tolerante	Controle	_b 0,462 aA	_a 0,516 aA	_a 0,185 aB	_a 0,185 aA
	Salino	_b 0,300 bA	_a 0,351 bA	_a 0,172 aA	_a 0,167 bA
Sensível	Controle	_a 0,364 aB	_a 0,384 aB	_a 0,209 aA	_a 0,188 aA
	Salino	_a 0,215 bB	_a 0,227 bB	_a 0,179 bA	_a 0,160 bA

⁽¹⁾ Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas entre genótipos para cada tratamento e nível de Ca, pelas mesmas letras minúsculas entre tratamentos para cada genótipo e nível de Ca e pelas mesmas letras minúsculas subscritas à esquerda entre níveis de Ca, para tratamento e genótipo, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, com P < 0,05. Fonte: Lacerda et al. (2004).

Nota-se que o estresse salino reduz o crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea da planta independentemente da tolerância e sensibilidade do genótipo. Nesses casos, a aplicação de cálcio torna-se importante para amenizar os impactos causados pela salinidade. É possível notar que o aumento da concentração de Ca²⁺ favoreceu o crescimento do genótipo tolerante, independentemente do estresse salino. No genótipo sensível, também é possível notar o aumento, porém com menor magnitude (Tabela 1). No sistema radicular, os resultados não apresentaram diferença significativa, entretanto, houve redução do peso de matéria seca da raiz com o aumento da concentração de cálcio. Ainda são bastante desuniformes os resultados voltados para o efeito do cálcio sobre o sistema radicular, podendo ir de reduções na produção e desenvolvimento até a maximização desses valores, variando de acordo com a espécie utilizada e as condições submetidas (Lacerda et al., 2004).

2.2.6 Magnésio

Fisiologicamente, o magnésio, constituinte da molécula da clorofila, exerce a função de ativação de enzimas importantes nos processos de fotossíntese e respiração da planta, como a Rubisco (ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase) e a PEPcase (phosphoenolpyruvate carboxylase), e na síntese de DNA e RNA (Taiz et al., 2017). Na produção animal, é um nutriente importante devido a sua presença manter elevado os teores de magnésio sérico e não provocar a tetania nos animais, que consiste numa desordem nutricional que ocorre em animais que tiveram fornecimento de forragem com a ausência de magnésio (Sengik, 2003; Soares et al., 2014).

A deficiência em magnésio desenvolve sintomas nas plantas (Figura 9), descritos como clorose entre as nervuras foliares, com a ocorrência primária em folhas mais velhas, e necrose nas regiões cloróticas, outros sintomas são a senescência, abscisão foliar prematura e amarelecimento e branqueamento das folhas. Esses dois últimos vão depender do período em que a planta estiver sem o fornecimento de magnésio. A clorose ocorre devido à clorofila presente nos feixes vasculares estar inalterada. Plantas forrageiras necessitam entre 2,0 a 4,0 g de magnésio para produzir 1 kg de matéria seca (Casela et al., 2007; Sengik, 2003; Taiz et al., 2017).

Figura 9. Sintomas da deficiência de magnésio na cultura do sorgo.



Fonte: Casela et al. (2007).

2.3 Micronutrientes

Assim como os macros, os micronutrientes exercem função extremamente importante no desenvolvimento das culturas agrícolas, elevando o tamanho e o ganho de peso em frutos, aumentando a taxa de grãos em cereais e promovendo o aumento do comprimento das partes vegetativas das plantas (Denisov et al., 2021; Horuz et al., 2021). Além disso, sua adição ao solo pode ser útil na correção de deficiências preexistentes. Por isso, a aplicação desses nutrientes para a maximização das culturas pode reduzir, indiretamente, uma ampla gama de problemas relacionado aos solos (Cavalcante et al., 2018; Taiz et al., 2017).

2.3.1 Ferro e cobre

O ferro é um elemento que atua como um catalisador no transporte de oxigênio e na formação da molécula de clorofila. Esse elemento pode ser absorvido pelas plantas tanto pela região apical (e.g., em cevada) quanto pela região radicular (e.g., no milho) e sua deficiência é visualizada com maior frequência em folhas novas com a aparição de clorose internerval. Essa ocorrência em folhas mais jovens se dá, devido ao fato de que o ferro não pode ser mobilizado das folhas mais velhas. Quando a deficiência é estendida, as folhas ficam com tonalidade branca (aclorofiladas), isso ocorre por que o ferro está envolvido na síntese dos complexos constituintes de clorofila (Casela et al., 2007; Taiz et al., 2017).

Assim como o ferro, o cobre exerce função importante na fotossíntese e na produção de clorofila. O ferro e o cobre estão envolvidos nas reações redox, onde o cobre é oxidado de Cu^+ a Cu^{2+} e o ferro em Fe^{2+} a Fe^{3+} . As deficiências causadas pelo cobre consistem na produção de folhas verdes escuras com manchas necrosadas. Além disso, pode ocorrer amarelecimento e murchamento das folhas. Em gramíneas, os sintomas são visualizados na panícula, que apresentam encurvamento e cor parda (Casela et al., 2007; Sengik, 2003; Taiz et al., 2017).

2.3.2 Zinco e manganês

Assim como todos os outros micronutrientes, o zinco possui importância no crescimento e desenvolvimento das plantas. Seu requerimento é disputado por várias enzimas, sendo até exigido na síntese da clorofila. Sua ausência causa nas plantas clorose internerval, que geralmente ocorre em plantas com baixo desenvolvimento radicular. O desenvolvimento das plantas é prejudicado, pois, a deficiência de zinco reduz o crescimento dos entrenós, causando um habito de crescimento conhecido como roseta, onde as folhas formam um agrupamento circular próximo ao solo. A deficiência também pode causar o

surgimento de folhas pequenas com a margem enrugada e retorcida. Nas folhas de sorgo, as folhas velhas podem apresentar manchas necróticas (Casela et al., 2007; Sengik, 2003; Taiz et al., 2017).

A função mais importante que o manganês exerce fisiologicamente está na ativação de inúmeras enzimas celulares. As principais delas estão diretamente envolvidas no ciclo de Krebs, as descarboxilases e as desidrogenases são restritamente ativadas pelo manganês. Entretanto, a sua função principal está relacionada à reação fotossintética que envolve a produção de oxigênio pela água e a produção de aminoácidos. Os principais sintomas relacionados à deficiência de manganês são o amarelecimento das folhas mais novas, manchas necróticas e clorose entre as nervuras (Casela et al., 2007; Sengik, 2003; Taiz et al., 2017).

2.3.3 Boro e molibdênio

As funções do boro (B) na planta seguem um caminho diferente em relação aos outros micronutrientes. Sua ação é ligada a síntese dos ácidos nucleicos (DNA, RNA) e respostas hormonais da planta, notadamente do ácido indolacético (AIA) (Taiz et al., 2017). Promovem também alongamento celular na parede celular. Quando deficiente em sistemas de cultivos, promove a morte do broto apical do ramo principal, prosseguindo para o broto presente nos ramos laterais. Além de provocar rachaduras no caule na cultura do tomate e superbrotamento nas culturas do citrus e café. No sorgo, a ausência de boro provoca o aparecimento de faixas transparentes e alongadas nas folhas jovens, além de apresentar baixa polinização, morte do órgão de crescimento e nas panículas surgem faixas de cor marrom originadas por cortiças na base dos grãos (Casela et al., 2007).

Um estudo realizado por Stewart et al. (2021) em Nebraska, USA, mostrou os efeitos do B, Fe, Mn e Zn, na produtividade final da cultura do milho após a aplicação via foliar. Os resultados mostraram que a aplicação em conjunto desses nutrientes, durante o pico da demanda nutricional da cultura, influenciou na absorção, translocação e partição desses nutrientes, indicando efeitos positivos na produtividade final da cultura.

O molibdênio (Mo) é extremamente importante no rendimento de várias espécies, pois, ajuda na fixação biológica de nitrogênio no solo, compondo várias enzimas como o nitrato redutase que atua na catalização do nitrato em nitrito durante a assimilação da célula. A nitrogenase que atua na fixação de nitrogênio convertendo o gás nitrogênio em amônia, a xantina desidrogenase, a aldeído oxidase e a sulfito oxidase. Quando deficiente em um sistema de cultivo, as plantas começam a apresentar clorose entre as nervuras e necrose em toda a área foliar. Seu equilíbrio dentro de um sistema produtivo, principalmente no que diz respeito ao cultivo de pastagens, deve ser levado rigorosamente a sério, pois o desequilíbrio pode gerar uma doença descrita como molibdenose, comum em ruminantes (Taiz et al., 2017).

A faixa ideal para a concentração de molibdênio na dieta animal é abaixo de 5 mg kg⁻¹, quando essa concentração no alimento fornecido ultrapassa 10 mg kg⁻¹ pode provocar uma intoxicação por molibdênio (molibdnose), a caracterização dessa doença se dá pelo efeito depressivo de molibdênio sobre a disponibilidade fisiológica de cobre (Schulte, 2004).

2.4 Eficiência biológica e econômica da adubação mineral na cultura do sorgo

A eficiência de utilização de nutrientes por uma cultura está baseada na conversão da quantidade absorvida de nutrientes em kg de matéria seca produzida (Silva et al., 2014). Assim, a cultura do sorgo dispõe de inúmeros trabalhos na literatura onde se indica a quantidade de nutrientes que foi aplicado aos sistemas e a produtividade final da cultura (Cavalcante et al., 2018; Cruz et al., 2020; Frias et al., 2018; Jardim et al., 2021b; Kirchner et al., 2019). Com isso é possível determinar a quantidade produzida em função da quantidade de nutriente aplicado.

O estudo realizado por Jardim et al. (2021b), avaliou três cultivares de sorgo em sistema de produção irrigado no Semiárido Pernambucano. As cultivares de sorgo utilizadas foram: 467, SF11 e 2502, e apresentaram produtividade de matéria seca (MS) de 18,33; 32,23 e 11,69 Mg ha⁻¹, respectivamente. Nesse estudo foram aplicados por hectare 73,5 kg de N; 94,5 kg

de K₂O e 84 kg de S, baseado na seguinte formulação de NPK+S: 14-00-18 + 16 S. Para cada kg de nitrogênio aplicado, as cultivares 467, SF11 e 2502, produziram 249,38; 438,50 e 159,04 kg de MS por kg de N aplicado. Já o potássio, para cada kg aplicado no solo, as três cultivares (467, SF11 e 2502) produziram 193,96; 341,05 e 123,7 kg de MS (Jardim et al., 2021b). Em plantas forrageiras, mais especificamente em gramíneas, os teores variam de 10 a 20 g kg⁻¹ MS para nitrogênio e 20 a 40 g kg⁻¹ MS para potássio (Sengik, 2003).

Uma das fontes de nitrogênio mais utilizadas no setor agrícola é a ureia (46% de N), devido à alta concentração de nitrogênio (Silva et al., 2020). O levantamento realizado pela Scot Consultoria indicou que o preço de mercado de uma tonelada de ureia custava R\$ 1.562,24 em 2021. Convertendo para kg, esse valor é de R\$ 1,56. Por outro lado, o saco de 50 kg de ureia custava R\$ 272,03, nas lojas especializadas em fertilizantes agrícolas. Nesse caso, o kg da ureia passa a custar R\$ 5,44. Com isso, o investimento feito por Jardim et al. (2021b), em que aplicaram 73,5 kg N (159,78 kg de ureia), foi de R\$ 1.088,12 para nitrogênio.

Já para a obtenção do potássio, as fontes mais usadas são cloreto e sulfato de potássio. O relatório elaborado pela agência de inteligência de mercado mostrou que o potássio obteve, em 2021, o maior o preço em mais de dez anos, custando R\$ 1.845,00 a tonelada, R\$ 1,85 kg. O saco (50 Kg) do sulfato de potássio (50% de K₂O) custava R\$ 313,31 levando em consideração a quantidade de K₂O aplicado por Jardim et al. (2021b). O investimento em potássio foi de R\$ 1.253,24.

A cultura do sorgo é comumente utilizada para a alimentação animal, sendo ela fornecida *in natura*, via pastejo direto ou fornecida picada no cocho, ou conservada, como silagem ou feno. O preço do quilo da silagem do sorgo vale em média R\$ 0,33 e o feno R\$ 0,70. Os valores de rendimento de matéria fresca e seca somados das três cultivares de sorgo avaliadas por Jardim et al. (2021b) indicaram que seria possível produzir 150,25 Mg ha⁻¹ de silagem, gerando uma renda aproximada de R\$ 49.582,50, ou 62,25 Mg ha⁻¹ de feno, gerando uma renda aproximada de R\$ 43.575,00. O investimento em fertilizantes chegou a um valor de R\$ 2.341,36. É correto afirmar que o uso de fertilizantes minerais melhora o rendimento da cultura do sorgo, trazendo retorno financeiro capaz de suprir os investimentos iniciais. Para o investimento nos fertilizantes é preciso aplicar o critério de custo benefício na escolha de melhor material de origem do nutriente. Isso é possível através de estudos comparando-os nas mais diversificadas condições ambientais.

A fonte dos nutrientes tem importância primordial na fatia econômica do processo agrícola. Assim, é importante saber qual delas é mais eficiente em função de cada cultura. No caso do sorgo, Hussein et al. (2021) mostraram (figura 5) a eficiência do uso de diferentes fontes de N e a influência sobre o rendimento de grãos de sorgo. Na tabela 2, é exposto o efeito econômico desses fertilizantes. Onde é possível entender os custos de cada fertilizantes nas duas condições de CTF e a margem bruta do lucro em dólares australianos.

Tabela 2. Receita bruta (GI), custo variável total (TVC) e margem bruta (GM) estimada para o sorgo em grão, cultivado em um Red Ferrosol em Toowoomba (Queensland, Austrália), com base nas taxas de aplicação de nitrogênio equivalentes ao MERN (taxa mais econômica de nitrogênio, kg ha⁻¹ N) e o Y MERN (rendimento do grão).

Tráfego e tratamento de fertilizantes		GI (AUD ha ⁻¹)		Custo do fertilizante	TVC	GM (AUD ha ⁻¹)	
		ZT (45%)	ST (65%)	AUD ha ⁻¹	AUD ha ⁻¹	ZT (45%)	ST (65%)
não CTF	UAN	702	615	99	268	434	347
	ENTEC®	534	464	79	248	286	216
	Ureia	623	554	92	261	362	293
CTF	UAN	832	–	126	295	537	–
	ENTEC®	638	–	143	312	326	–
	Ureia	727	–	115	284	443	–

Os custos constantes foram estimados em AUD169 ha⁻¹ em ambos os tratamentos de tráfego e incluíram o custo de sementes, operações de campo e proteção de cultivos. ZT: plantio direto, ST: plantio direto. O número entre parênteses denota áreas com rodas nos sistemas ZT e ST expressas como porcentagem da área de campo cultivada. CTF é considerado em ZT, prática padrão na Austrália. Conversão de moeda AUD1 ≈ USD0,75. Fonte: Hussein et al. (2021).

As maiores margens de lucros (537 AUD ha⁻¹ ou 402,75 USD ha⁻¹) foram observadas no sorgo fertilizado com o nitrato de ureia amônio (UAN, 32% N), onde o custo do fertilizante foi de 126 AUD ha⁻¹ (94,5 USD ha⁻¹) e o custo de variável total foi de 295 AUD ha⁻¹ (221,5 USD ha⁻¹). Em comparação com apenas o uso da ureia, o estudo mostrou uma diferença positiva na margem bruta de 94 AUD ha⁻¹ favorável para a solução de nitrato de ureia amônio. Esse produto é comercializado por grandes empresas especializadas em fertilidade do solo e nutrição vegetal. A empresa Mosaic disponibiliza em seu site várias atribuições desse produto, desde a produção da solução até a forma de utilização.

A porcentagem de N nessa solução (28 a 32%) varia de acordo com a temperatura da região em que o produto é utilizado. Isso se dá, devido a solubilidade da solução, que aumenta de acordo com o aumento da temperatura. Em regiões frias, o produto é mais diluído para evitar a precipitação em formas de cristais. Essa solução possui vantagens como a fácil assimilação das plantas no solo, devido às formas de N disponíveis, podendo ser na forma de NO₃ e NO₄⁺ (MOSAIC, 2022).

Além do sorgo, o nitrato de uréia amônio (UAN 28-32%) se mostrou ser uma excelente escolha em outras culturas agrícolas. Devido a sua importância, um estudo foi realizado afim de diminuir as perdas de N quando aplicado através da solução UAN. Sabe-se que essa solução possui susceptibilidade a lixiviação, volatilização e desnitrificação. Entretanto, tem boa compatibilidade com outros fertilizantes. Com isso, para reduzir as perdas de N e aumentar eficiência na recuperação de nitrogênio. Foi desenvolvido um novo fertilizante (UCAN-23), sendo composto por uréia, nitrato amônio e cálcio. Resultados mostraram elevação na absorção e redução nas perdas de amônio quando o N foi aplicado com o Ca. Assim como o aumento dos rendimentos com doses mais baixas de N, aumentando sua eficiência bioeconômica (Slaton, 2013).

3. Considerações Finais

O sorgo é uma cultura de grande relevância no cenário agrícola, principalmente no que diz respeito à produção animal. Comumente, é cultivado para elevar o valor nutritivo de forragem nas regiões áridas e semiáridas. Entretanto, devido às mudanças climáticas que vem ocorrendo em todo o planeta, sua produção vem sendo reduzida conforme os problemas com escassez hídrica vêm aumentando ao longo dos últimos anos. Por isso, é preciso potencializar o aporte forrageiro dessa cultura com técnicas de manejo como a adubação mineral. Apesar de ser amplamente difundida e apresentar bons resultados, ainda são escassos os trabalhos na literatura que priorizam o estudo da eficiência bioeconômica da adubação mineral. Por outro lado, é comum encontrar trabalhos que indiquem apenas os aspectos quantitativos, fornecendo a quantidade aplicada de nutrientes e

em que dosagem a cultura apresentou o maior rendimento. Mas não detalha a ação direta de cada nutriente no rendimento final da cultura, sem indicar as taxas de acúmulo de cada macro e micronutrientes na parte aérea ou no sistema radicular.

Dessa forma, recomenda-se a realização de pesquisas mais específicas voltadas para a eficiência bioeconômica da adubação mineral na cultura do sorgo em diferentes sistemas de produção, a fim de fornecer subsídios para a melhoria e maximização da produção dessa cultura, e consequentemente, promover o desenvolvimento socioeconômico das regiões envolvidas no cultivo do sorgo.

Agradecimentos

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código Financeiro 001), e a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pela concessão das bolsas de estudo.

Referências

- Ahanger, M. A., & Agarwal, R. M. (2017). Potassium up-regulates antioxidant metabolism and alleviates growth inhibition under water and osmotic stress in wheat (*Triticum aestivum* L). *Protoplasma*, 254(4), 1471–1486. [10.1007/s00709-016-1037-0](https://doi.org/10.1007/s00709-016-1037-0)
- Ahanger, M. A., Agarwal, R. M., Tomar, N. S., & Shrivastava, M. (2015). Potassium induces positive changes in nitrogen metabolism and antioxidant system of oat (*Avena sativa* L cultivar Kent). *Journal of Plant Interactions*, 10(1), 211–223. <https://doi.org/10.1080/17429145.2015.1056260>
- Ainsworth, E. A., & Long, S. P. (2005). What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *Global Change Biology*, 23(3), 351–371. [10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x)
- Albuquerque, C. J. B., Camargo, R. de, & Souza, M. F. de. (2013). Macronutrient uptake in sorghum plants in different arrangements. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 12(1), 10–20.
- Albuquerque, C. J. B., Souza, T. H. S., Costa, L. M., Rocha, F. da S., Monção, F. P., Rigueira, J. P. S., & Rocha Junior, V. R. (2020). Uso do clorofilômetro e sua relação com o manejo da adubação nitrogenada em cultivares de sorgo granífero e silageiro na região semiárida. *Brazilian Journal of Development*, 6(4), 16976–16993. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n4-024>
- Ali, A. Y. A., Ibrahim, M. E. H., Zhou, G., Nimir, N. E. A., Elsiddig, A. M. I., Jiao, X., Zhu, G., Salih, E. G. I., Suliman, M. S. E. S., & Elradi, S. B. M. (2021). Gibberellic acid and nitrogen efficiently protect early seedlings growth stage from salt stress damage in Sorghum. *Scientific Reports*, 11(1), 1–11. [doi: 10.1038/s41598-021-84713-9](https://doi.org/10.1038/s41598-021-84713-9)
- Alves, C. P., Silva, T. G. F., Alves, H. K. M. N., Jardim, A. M. da R. F., Souza, L. S. B. de, Cruz Neto, J. F. da, & Santos, J. P. A. de S. (2020). Consórcio palma-sorgo sob lâminas de irrigação: balanço de água no solo e coeficientes da cultura. *Agrometeoros*, 27(2), 347–356. [10.31062/agrom.v27i2.26448](https://doi.org/10.31062/agrom.v27i2.26448)
- Amarakoon, D., Lou, Z., Lee, W. J., Smolensky, D., & Lee, S. H. (2021). A mechanistic review: potential chronic disease-preventive properties of sorghum. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(7), 2641–2649. [10.1002/jsfa.10933](https://doi.org/10.1002/jsfa.10933)
- Araújo, S., Oliveira, S., Eduardo, J., & Calixto, D. (2021). Fósforo no crescimento inicial de mogno-africano Phosphorus in the early growth of African mahogany. *Advances in Forestry Science*, 8(1), 1301–1309. [10.34062/afs.v8i1.9728](https://doi.org/10.34062/afs.v8i1.9728)
- Arf, O., Meirelles, F. C., Portugal, J. R., Buzetti, S., Sá, M. E., & Rodrigues, R. A. F. (2018). Benefícios do milho consorciado com gramínea e leguminosas e seus efeitos na produtividade em sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 17(3), 431–444.
- Asadi, M., & Eshghizadeh, H. R. (2021). Response of sorghum genotypes to water deficit stress under different CO₂ and nitrogen levels. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158(November 2020), 255–264. [10.1016/j.plaphy.2020.11.010](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.010)
- Ataíde, G. da M., Flores, A. V., & Borges, E. E. de L. e. (2012). Alterações Fisiológicas e Bioquímicas em Sementes de *Pterogyne nitens* Tull. Durante o Envelhecimento Artificial. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(1), 71–76. www.agro.ufg.br/pat
- Atube, F., Malinga, G. M., Nyeko, M., Okello, D. M., Alarakol, S. P., & Okello-Uma, I. (2021). Determinants of smallholder farmers' adaptation strategies to the effects of climate change: Evidence from northern Uganda. *Agriculture and Food Security*, 10(1), 1–14. [10.1186/s40066-020-00279-1](https://doi.org/10.1186/s40066-020-00279-1)
- Balakrishna, D., Vinodh, R., Madhu, P., Avinash, S., Rajappa, P. V., & Bhat, B. V. (2019). Tissue culture and genetic transformation in sorghum bicolor. In B. S. for diverse end Uses (Ed.), *Breeding Sorghum for Diverse End Uses* (Woodhead P). Elsevier Ltd. [10.1016/B978-0-08-101879-8.00007-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101879-8.00007-3)
- Bernardes, J. V. S., Júnior, V. O., Charlo, H. C. de O., Fernandes, G., & Bosco, L. P. V. (2019). Doses de potássio para o sorgo sacarino destinado à produção de etanol Potassium rates for sweet sorghum cultivated for ethanol production. *Nativa*, 7(1), 23–28.
- Bortoli, S. A., Dória, H. O. S., Albergaria, N. M. M. S., & Bott, M. V. (2005). ASPECTOS BIOLÓGICOS E DANO DE *Diatraea saccharalis* (Fabr., 1794) (LEPIDOPTERA: PYRALIDAE) EM SORGO CULTIVADO SOB. *Ciência Agrotécnologia*, 29(2), 267–273.
- Butterly, C. R., Armstrong, R., Chen, D., & Tang, C. (2016). Free-air CO₂ enrichment (FACE) reduces the inhibitory effect of soil nitrate on N₂ fixation of *Pisum sativum*. *Annals of Botany*, 117(1), 177–185. [10.1093/aob/mcv140](https://doi.org/10.1093/aob/mcv140)

- Calviño, M., & Messing, J. (2012). Sweet sorghum as a model system for bioenergy crops. *Current Opinion in Biotechnology*, 23(3), 323–329. [10.1016/j.copbio.2011.12.002](https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.12.002)
- Casela, C., Ferreira, A. S., Fernandes, F. T., & Pinto, N. F. J. (2007). Cultivo do Sorgo. *Embrapa*, 3, 1–11. https://www.spo.cnpia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducao16_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=3809&p_r_p_-996514994_topicId=3
- Cavalcante, T. J., Castoldi, G., Rodrigues, C. R., Nogueira, M. M., & Albert, A. M. (2018). Macro and micronutrients uptake in biomass sorghum. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 48(4), 364–373. [10.1590/1983-40632018v48i51874](https://doi.org/10.1590/1983-40632018v48i51874)
- Coelho, D. S., Simões, W. L., Salviano, A. M., Souza, M. A., & Santos, J. E. (2017). Acúmulo e distribuição de nutrientes em genótipos de sorgo forrageiro sob salinidade. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 16(2), 178–192. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v16n2p178-192>
- Costa, K. A. P., Faquin, V., & Oliveira, I. P. (2010). Doses e fontes de nitrogênio na recuperação de pastagens do capim-marandu Nitrogen doses and sources on pasture recuperation of grass marandu. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 62(1), 192–199.
- Cruz, S. S., Andreotti, M., Pascoaloto, I. M., Lima, G. C. de, & Soares, C. de A. (2020). Production in forage sorghum intercropped with grasses and pigeon. *Revista Ciência Agronômica*, 51(2), 1–10. [10.5935/1806-6690.20200031](https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200031)
- Denisov, K., Kibalnik, O., Efremova, I., & Bochkareva, J. (2021). The application of chelated forms of micronutrient fertilizers in sorghum cultivation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 723(2). [10.1088/1755-1315/723/2/022017](https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/2/022017)
- Doussan, C., Pagèse, L., & Pierret, A. (2003). Soil exploration and resource acquisition by plant roots: an architectural and modelling point of view. *Agronomie*, 23, 419–431. [10.1051/agro2003027](https://doi.org/10.1051/agro2003027)
- Duart, V. M., Garbuio, F. J., & Caires, E. F. (2021). Does direct-seeded rice performance improve upon lime and phosphogypsum use? *Soil and Tillage Research*, 212(November 2020). [10.1016/j.still.2021.105055](https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105055)
- Fernandes, P. G., May, A., Coelho, F. C., Abreu, M. C., & Bertolino, K. M. (2014). Influência do espaçamento e da população de plantas de sorgo sacarino em diferentes épocas semeadura. *Ciencia Rural*, 44(6), 975–981. [10.1590/S0103-84782014000600004](https://doi.org/10.1590/S0103-84782014000600004)
- Ferrazza, R. D. A., Lopes, M. A., & Albuquerque, C. J. B. (2016). Avaliação bioeconômica do consórcio de sorgo com diferentes espécies forrageiras para sistema de integração lavoura-pecuária em Nova Porteirinha, MG. *Boletim de Indústria Animal*, 73(2), 94–102. [http://dx.doi.org/10.17523/bia.v73n2p94](https://doi.org/10.17523/bia.v73n2p94)
- Frias, D. B., Coelho, M. R., Costa, M. A., & Cizanska, I. (2018). Produtividade e qualidade do sorfo forrageiro na região norte do Paraná submetido a diferentes níveis de adubação nitrogenada. *Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa*, 34, 321–332.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Nahar, K., Hossain, M. S., Al Mahmud, J., Hossen, M. S., Masud, A. A. C., Moumita, & Fujita, M. (2018). Potassium: A vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy*, 8(3). [10.3390/agronomy8030031](https://doi.org/10.3390/agronomy8030031)
- Horuz, A., Gunes, A., Turan, M., Denir, T., Serdar, U., Ozlu, E., Karaman, M. R., & Firildak, G. (2021). The Effects of Different Micronutrient Fertilizers on cv. Tombul Hazelnut Yield and Certain Nut Properties. *Erwerbs-Obstbau*, 63, 107–114. doi.org/10.1007/s10341-021-00546-w
- Hussein, M. A., Antille, D. L., Kodur, S., Chen, G., & Tullberg, J. N. (2021). Controlled traffic farming effects on productivity of grain sorghum, rainfall and fertiliser nitrogen use efficiency. *Journal of Agriculture and Food Research*, 3(January), 100111. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100111>
- Jardim, A. M. da R. F., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B. de, Araújo Júnior, G. do N., Alves, H. K. M. N., Souza, M. de S., Araújo, G. G. L. de, & Moura, M. S. B. de. (2021b). Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. *Journal of Arid Environments*, 188(February 2020), 104464. [10.1016/j.jaridenv.2021.104464](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104464)
- Jardim, A. M. R. F., Silva, G. I. N., Biesdorf, E. M., Pinheiro, A. G., Silva, M. V., Araújo Júnior, G. N., & Silva, T. G. F. (2020). Production potential of Sorghum bicolor (L.) Moench crop in the Brazilian semiarid: review. *PUBVET*, 14(4), 1–13. <https://doi.org/10.31533/pubvet.v14n4a550.1-13>
- Jardim, A. M. R. F., Silva, M. V., Silva, A. R., dos Santos, A., Pandorf, H., Oliveira-Júnior, J. F., de Lima, J. L. M. P., Souza, L. S. B., Araújo Júnior, G. N., Lopes, P. M. O., Moura, G. B. A., & Silva, T. G. F. (2021a). Spatiotemporal climatic analysis in Pernambuco State, Northeast Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 105733. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105733>
- Jardim, A. M. R. F., Souza, L. S. B., Alves, C. P., Araújo, J. F. N., Souza, C. A. A., Pinheiro, A. G., Araújo, G. G. L., Campos, F. S., Tabosa, J. N., & Silva, T. G. F. (2021c). Intercropping forage cactus with sorghum affects the morphophysiology and phenology of forage cactus. *African Journal of Range and Forage Science*, 38:1-12. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.194974>
- Jatav, K., Agarwal, R., Tomar, N., & Tyagi, S. R. (2014). Nitrogen metabolism, growth and yield responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) to restricted water supply and varying potassium treatments. *J Indian Bot Soc*, 933(July 2015), 177–189.
- Kirchner, J. H., Robaina, A. D., Peiter, M. X., Torres, R. R., Mezzomo, W., Humberto, L., Ben, B., Pimenta, B. D., & Pereira, A. C. (2019). Funções de produção e eficiência no uso da água em sorgo forrageiro irrigado Introdução. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 14(2), 9. [10.5039/agraria.v14i2a5646](https://doi.org/10.5039/agraria.v14i2a5646)
- Lacerda, C. F., Cambraia, J., Oliva, M. A., & Ruiz, H. A. (2004). Influência do cálcio sobre o crescimento e solutos em plântulas de sorgo estressadas com cloreto de sódio. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 28(2), 289–295. [10.1590/s0100-06832004000200007](https://doi.org/10.1590/s0100-06832004000200007)
- Leite, R. M. C., Jardim, A. M. R. F., Júnior, G. D. N. A., Alves, C. P., da Silva, G. I. N., Rocha, A. K. P., & da Silva, T. G. F. (2022). Uso biofertilizantes para intensificação sustentável da produção de palma forrageira irrigada e uso indicadores agrometeorológicos para avaliação. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 1(01), 4181–4201. <https://doi.org/10.26848/rbfg.v15.1.p4181-4201>
- Li, Y., Yu, Z., Liu, X., Mathesius, U., Wang, G., Tang, C., Wu, J., Liu, J., Zhang, S., & Jin, J. (2017). Elevated CO₂ increases Nitrogen fixation at the reproductive phase contributing to various yield responses of soybean cultivars. *Frontiers in Plant Science*, 8(September). [10.3389/fpls.2017.01546](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01546)

- Lipiec, J., & Stępniewski, W. (1995). Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil and Tillage Research*, 35(1–2), 37–52. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00474-7](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00474-7)
- Magadala, A., Kleinert, A., Dreyer, L. L., & Valentine, A. J. (2014). Low-phosphorus conditions affect the nitrogen nutrition and associated carbon costs of two legume tree species from a Mediterranean-type ecosystem. *Australian Journal of Botany*, 62, 1–9. [10.1071/BT13264](https://doi.org/10.1071/BT13264)
- Menezes, C. B. D., Silva, K. J. D., Teodoro, L. P. R., Santos, C. V. D., Julio, B. H. M., Portugal, A. F., & Teodoro, P. E. (2021). Grain sorghum hybrids under drought stress and full-irrigation conditions in the Brazilian Semiarid. *Journal of Agronomy and Crop Science*. <https://doi.org/10.1111/jac.12539>
- Miransari, M., Bahrami, H. A., Rejali, F., & Malakouti, M. J. (2009). Effects of soil compaction and arbuscular mycorrhiza on corn (*Zea mays* L.) nutrient uptake. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 282–290. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.015>
- MOSAIC. Nitrate de Uréia Amônio. The Mosaic Company. <<https://www.cropnutrition.com/resource-library/urea-ammonium-nitrate>>
- Raulino, J. B., Silveira, C. S., & Lima Neto, I. E. (2021). Assessment of climate change impacts on hydrology and water quality of large semi-arid reservoirs in Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 66(8), 1321–1336. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1933491>
- Romeu, A., Freire, C. S., Francilene, A., Cantídio, E., Oliveira, A. De, Freire, F. J., & Lemos, R. (2020). Manejo da adubação nitrogenada em solo alcalino cultivado com sorgo Sudão. *Revista GEAMA – Ciências Ambientais e Biotecnologia*, 6(2), 72–80.
- Santi, A., Camargos, S. L., Pereira, W. L. M., & Scaramuzza, J. F. (2005). Deficiência de micronutrientes em sorgo (*Sorghum bicolor*). *Medicina*, 54–63.
- Santos, F. C., Albuquerque Filho, M. R., Resende, Á. V., Oliveira, A. C., Oliveira, M. S., & Gomes, T. C. (2015). Adubação Nitrogenada e Potássica na Nutrição e na Extração de Macronutrientes pelo Sorgo Biomassa. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 14(1), 10–22. [10.18512/1980-6477/rbms.v14n1p10-22](https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v14n1p10-22)
- Schulte, E. E. (2004). Soil and Applied Zinc (A2528). *Understanding Plant Nutrients*, 2.
- Sengik, E. S. (2003). Os macronutrientes e os micronutrientes das plantas. *Revista Ciências Agrárias*, 1(2), 22–46.
- Silva, P. O., Carlos, L., Costa, A. M., Dias, J. S., Veneziano, V. M., & Rodrigues, C. R. (2020). Ureia como fonte de nitrogênio na fisiologia e crescimento inicial de *Guazuma ulmifolia* Lam. (Malvaceae). *Ciência Florestal*, 30(4), 1192–1200. [10.5902/1980509842643](https://doi.org/10.5902/1980509842643)
- Silva, T. G. F., Araújo Primo, J. T., Silva, S. M. S. e, Moura, M. S. B. de, Santos, D. C. dos, Silva, M. da C., & Araújo, J. E. M. (2014). Indicadores de eficiência do uso da água e de nutrientes de clones de palma forrageira em condições de sequeiro no Semiárido brasileiro. *Bragantia*, 108.
- Slaton, N. A. (2013). Wayne E. Sabbe *Arkansas Soil Fertility Studies 2012*.
- Soares, J. D. P., Luz, E. A., Campos, J. F., & Ferreira, A. F. M. S. C. (2014). INTOXICAÇÃO POR AMÔNIA EM RUMINANTES. *MV&Z*, 12(3), 83.
- St. Luce, M., Whalen, J. K., Ziadi, N., & Zebarth, B. J. (2011). Nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils. *Advances in Agronomy* (Vol. 112, pp. 55–102). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385538-1.00002-0>
- Stewart, Z. P., Paparozzi, E. T., Wortmann, C. S., Jha, P. K., & Shapiro, C. A. (2021). Effect of Foliar Micronutrients (B, Mn, Fe, Zn) on Maize Grain Yield, Micronutrient Recovery, Uptake, and Partitioning. *Plants*, 10(528), 1–25. <https://doi.org/10.3390/plants10030528>
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*. pdf. In Artmed (Ed.), *Biochemical Education* (6°). <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0307441276901217>
- Tittal, M., Mir, R. A., Jatav, K. S., & Agarwal, R. M. (2021). Supplementation of potassium alleviates water stress-induced changes in *Sorghum bicolor* L. *Physiologia plantarum*, 172(2), 1149–1161. <https://doi.org/10.1111/ppl.13306>
- Ul-Allah, S., Ijaz, M., Nawaz, A., Sattar, A., Sher, A., Naeem, M., Shahzad, U., Farooq, U., Nawaz, F., & Mahmood, K. (2020). Potassium application improves grain yield and alleviates drought susceptibility in diverse maize hybrids. *Plants*, 9(1), 1–11. [10.3390/plants9010075](https://doi.org/10.3390/plants9010075)
- Zheng, H., U, Y. L. I., N, Y. Q. I., Chen, Y., & N, M. F. A. (2015). Establishing dynamic thresholds for potato nitrogen status diagnosis with the SPAD chlorophyll meter. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(1), 190–195. [10.1016/S2095-3119\(14\)60925-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60925-4)