

### Dinâmica do enxofre no sistema solo planta e sua participação no metabolismo e nutrição de plantas: uma revisão

### Sulfur dynamics in the soil-plant system and its participation in plant metabolism and nutrition: a review

Jéssica Karina Mesquita Vieira <sup>1</sup>, Rikelme Matheus dos Santos Relvas <sup>2</sup>, Emily Nogueira Alves <sup>1</sup>, Luiz Fernando Gois dos Santos <sup>1</sup>, Bárbara Vieira dos Santos <sup>1</sup>, Rosivaldo Machado da Silva Júnior <sup>1</sup>, Maria Eduarda Carneiro de Oliveira<sup>1</sup>, Esthefany Oliveira Torres <sup>3</sup>, Richard Wallace Santos Nepomuceno <sup>4</sup>, Mariana Pina da Silva Berti <sup>1</sup> +

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Goiás

<sup>2</sup> Universidade Federal de Viçosa

<sup>3</sup> Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão

<sup>4</sup> Faculdade Venda Nova do Imigrante

**Resumo.** O enxofre (S) é um macroelemento essencial para o crescimento, desenvolvimento e mecanismos de defesa da planta, contribuindo na proteção contra pragas e doenças. A disponibilidade de enxofre no solo é influenciada por processos de oxidação e redução mediados por microrganismos. Porém, os solos brasileiros são deficientes em enxofre, com concentrações que podem variar de 0,1% em solos minerais até 1% em solos orgânicos influenciados por processos microbiológicos nos solos para a disponibilização desse nutriente as plantas. Dessa forma, a deficiência de enxofre se torna um fator limitante da produção agrícola em extensas áreas do Brasil, em especial na região do cerrado. Essa revisão foca na dinâmica do S no sistema solo-planta, seus mecanismos de absorção e transporte, requisitos nutricionais para culturas agrícolas e os sintomas de deficiências nutricionais.

**Palavras-chave:** Deficiência nutricional; macronutriente; marcha de absorção; metabolismo vegetal; sistema solo-planta.

**Abstract.** Sulfur (S) is an essential macroelement for plant growth, development and defense mechanisms, contributing to protection against pests and diseases. The availability of sulfur in the soil is influenced by oxidation and reduction processes mediated by microorganisms. However, Brazilian soils are deficient in sulfur, with concentrations that can vary from 0.1% in mineral soils to 1% in organic soils, influenced by microbiological processes in the soil to make this nutrient available to plants. Thus, sulfur deficiency becomes a limiting factor in agricultural production in large areas of Brazil, especially in the cerrado region. This review focuses on the dynamics of S in the soil-plant system, its absorption and transport mechanisms, nutritional requirements for agricultural crops and the symptoms of nutritional deficiencies

**Keywords:** Nutrient deficiency; macronutrients; absorption march; plant metabolism; soil-plant system.

#### Contextualização e Análise

O enxofre (S) é um macroelemento essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, sendo considerado o quarto nutriente mais importante, depois do nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) (Liet *et al.*, 2020). Estima-se que o S seja um dos elementos mais abundantes no planeta, no qual, é um dos principais constituintes dos minerais, podendo ser encontrado como sulfetos, sulfatos e mesmo como S elementar, sendo utilizado largamente na agricultura brasileira,

que consome 53% da produção, seguido pelas indústrias químicas (47%) (Stipp & Casarin, 2010).

Bioquimicamente, o S é um elemento mineral capaz de transitar entre diversos estados de oxidação, permitindo que compostos contendo enxofre participem de uma ampla variedade de reações químicas (Kopriva *et al.*, 2019). Esse macroelemento desempenha funções vitais para o desenvolvimento das plantas, sendo essencial na qualidade da produção, na participação de constituições fisiológicas, controle hormonal,

fotossíntese até os mecanismos de defesa da planta, contribuindo na proteção contra pragas e doenças (César, 2012).

Porém, os solos brasileiros são deficientes em enxofre, com concentrações que podem variar de 0,1% em solos minerais até 1% em solos orgânicos, demonstrando que a maior parte do enxofre encontrado no solo está associada com a presença de compostos orgânicos, influenciado principalmente por processos microbiológicos nos solos para a disponibilização desse nutriente as plantas (Pereira et al., 2016).

As limitações de enxofre nas plantas são manifestadas no ponto de convergência das rotas assimilatórias, podendo ocasionar acúmulo ou carência de produtos sintetizados, causando desbalanço nutricional, que irá refletir negativamente na síntese da maioria das proteínas vegetais (Nikiforova et al., 2006; Silva et al., 2017). Desta forma, a deficiência de enxofre se torna um fator limitante da produção agrícola em extensas áreas do Brasil, em especial nas áreas de cerrado (Oliveira et al., 2020). Portanto, está revisão bibliográfica tem como objetivo abordar a dinâmica do elemento no sistema solo-planta, mecanismo de absorção, transporte e redistribuição, marcha de absorção, a exigência do enxofre nas principais culturas agrícolas, além da participação no metabolismo vegetal e os sintomas de deficiências nutricionais

A disponibilidade de enxofre no solo é diretamente influenciada por processos de oxidação e redução mediados por microrganismos. Em solos bem drenados e aeróbicos, prevalece a formação de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), forma facilmente absorvível pelas plantas. Contudo, em solos alagados, sob condições anaeróbicas, o enxofre é transformado em sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), um gás tóxico para as plantas, que é perdido para a atmosfera (Carvalho & Moreira, 2023).

Conforme Reetz (2017), o enxofre é encontrado no solo principalmente como sulfatos inorgânicos e compostos orgânicos, no qual, precisa ser mineralizado para o ânion sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) para ser absorvido pelas plantas. Outra fonte adicional de S é o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) presente na atmosfera, que pode fornecer grandes quantidades de enxofre (20 Kg/ha ou mais) em áreas onde são queimados combustíveis fósseis. Entretanto, o enxofre presente nos solos na forma de sulfato pode ser lixiviado para fora na zona radicular das plantas (Figura 1), especialmente em solos arenosos (Reetz, 2017).

Quando fornecido na forma de fertilizantes sintéticos, os grânulos de S em contato com a umidade do solo desmancham-se em finíssimas partículas de enxofre que são oxidadas por ação das bactérias do gênero *Thiobacillus*, transformando-as em  $\text{SO}_4^{2-}$  solúvel no solo (Figura 1), no qual, é a principal forma absorvida pelas plantas (Reis et al., 2015).

#### Dinâmica do Enxofre no Sistema Solo-Planta

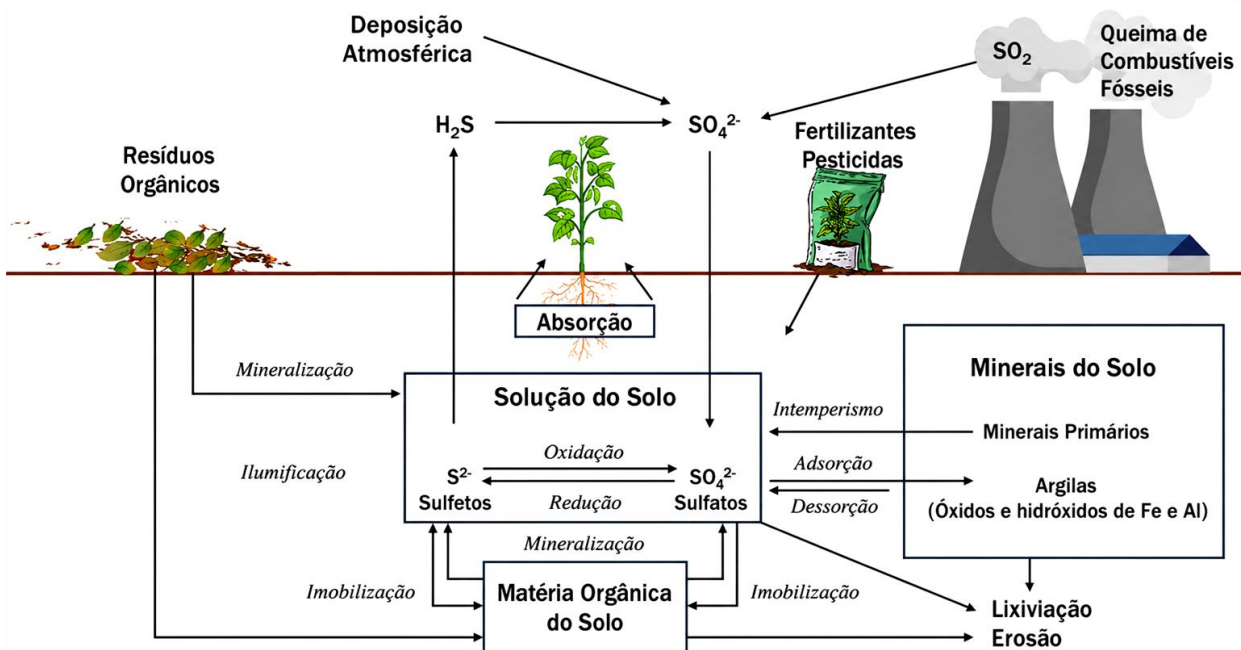


Figura 1. Dinâmica, formas e fluxos do enxofre no sistema solo-planta-atmosfera.

Fonte: Adaptado de Alvarez et al., 2007.

De acordo com Kertesz e Mirleau (2004), o estoque de S presente no solo está sempre em transformação, sendo parte do S-inorgânico

transformado em S-orgânico, pelo processo de imobilização, e/ou diferentes formas de S-orgânico se inter-convertendo e simultaneamente parte do S

imobilizado sendo convertido em formas inorgânicas disponíveis às plantas, por meio do processo de mineralização (Figura 1).

Conforme já mencionado, o enxofre é absorvido pelas plantas majoritariamente na forma de  $\text{SO}_4^{2-}$ , retirado da solução do solo por meio do transporte ativo mediado por proteínas transportadoras específicas. Esse processo envolve o cotransporte de três prótons para cada molécula de  $\text{SO}_4^{2-}$  absorvida pelas raízes, sendo regulado por diversos fatores, inclusive a especiação do enxofre no solo, influenciada por processos pedogenéticos e fatores físico-químicos (Chaudhary *et al.*, 2023).

Antes que a absorção do enxofre ocorra, o primeiro contato entre o elemento e as raízes dá-se por meio de um processo denominado fluxo de massa. Este fenômeno é intrinsecamente associado à movimentação da água dentro do sistema solo-planta, o que implica que a eficiência desse transporte está diretamente ligada à taxa de absorção hídrica e à concentração de sulfato na solução do solo. Assim, quanto maior for o volume de água translocado e a disponibilidade de íons sulfato, mais significativo será o contato entre o nutriente e a raiz, facilitando a subsequente etapa de absorção (Prado, 2020).

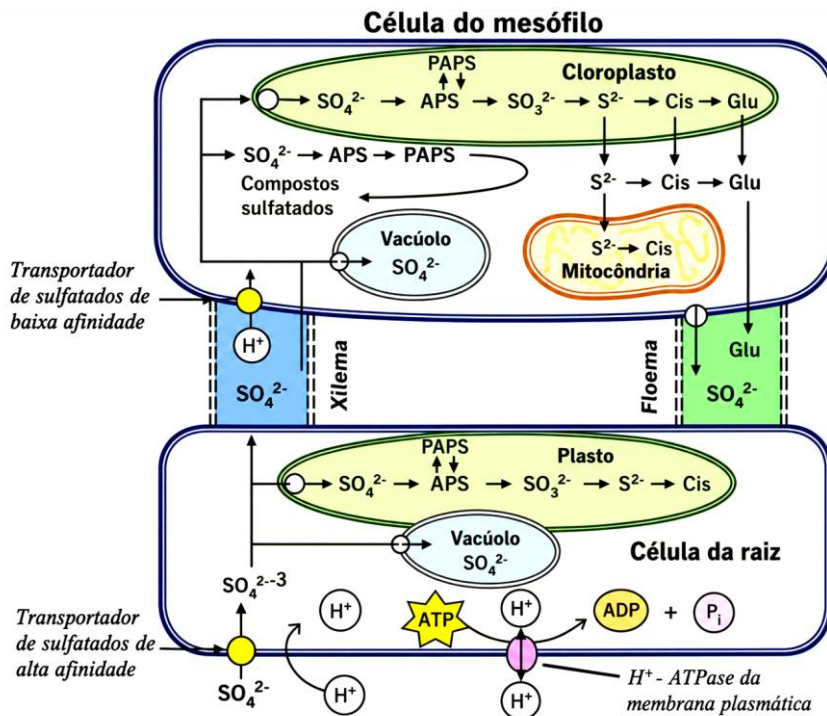
Assim, a dinâmica do enxofre no sistema solo-planta é um processo complexo, envolvendo interações bioquímicas e ambientais que garantem

sua disponibilidade e assimilação nas formas necessárias para o desenvolvimento vegetal.

### Absorção, Transporte e Redistribuição

Explorar as funções e a regulação de transportadores e enzimas envolvidos no metabolismo do enxofre, que desempenham papéis cruciais na assimilação, distribuição e utilização de enxofre nas plantas, tem sido um foco central de pesquisa, devido à sua importância na qualidade nutricional das culturas.

A absorção acontece, em sua maior parte, na forma de  $\text{SO}_4^{2-}$ , embora também possa ocorrer como S-orgânico,  $\text{SO}_2$  e S molhável pelas folhas (Domingos, 2015). O sulfato é translocado tanto no xilema quanto no floema, sendo intercambiável entre essas vias, alcançando as folhas onde é incorporado a esqueletos carbônicos (Larson *et al.*, 1991). Hartmann *et al.* (2006) relataram que compostos contendo enxofre reduzido podem ser transportados tanto na direção acrópeta, em direção às folhas em desenvolvimento, quanto na direção basípeta, para o caule e as raízes. No entanto, Taiz *et al.* (2017) relata que essa redistribuição não ocorre com facilidade para as folhas jovens na maioria das espécies, podendo também, em muitas espécies vegetais, a clorose ocorrer simultaneamente em todas as folhas, ou ainda começar em folhas mais velhas.



**Figura 2.** Esquema representativo geral da absorção, redução, transporte e redistribuição de sulfato e compostos em plantas. Cis = Cisteína; Glu = Glutaciona; APS = 5'-adenosinafosfosulfato; PAPS = adenosina-3'-fosfato-5'-fosfosulfato. **Fonte:** Adaptado de Jones *et al.*, 2013.

Nas folhas o enxofre assimilado é transportado via floema para áreas de síntese

proteica, como frutos e os ápices dos caules e raízes, predominantemente na forma de glutaciona

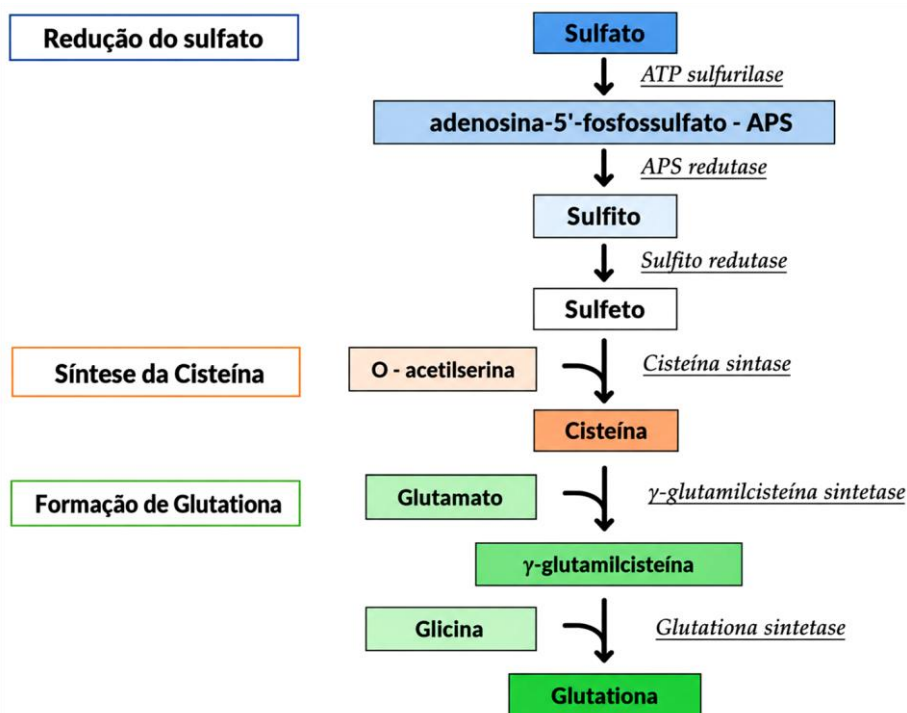
(Figura 2) (Taiz et al., 2017). O enxofre assimilado é distribuído até os órgãos drenantes da planta nessa forma, promovendo a formação de compostos orgânicos vitais, como aminoácidos, entre eles a cisteína, que é precursora da metionina, ambos essenciais para o metabolismo proteico (Carvalho & Moreira, 2023; Hansel et al., 2021). Em regiões com níveis altos de poluição atmosférica, as folhas são capazes de absorver e assimilar o SO<sub>2</sub>, tornando-se uma fonte significativa de enxofre para o crescimento das plantas (Costa, 2014).

Já nas raízes o S é transportado predominantemente na direção acrópeta, ou seja, da base para o topo, e a capacidade da planta de redistribuir o enxofre na direção basípeta é muito limitada, resultando em sintomas de deficiência nos órgãos mais novos, como as folhas superiores, em caso de insuficiência de enxofre (Malavolta, 2006). Dessa forma, observamos que há uma complexidade no transporte e redistribuição de compostos contendo enxofre nas plantas, que, embora exista a capacidade de transporte do enxofre, a eficácia desse processo pode variar conforme a espécie e o estágio de desenvolvimento

da planta.

#### Participação no Metabolismo Vegetal

Metabolicamente, uma vez que a planta adquire sulfato do ambiente, o elemento precisa ser ativado para uma forma funcional (cisteína e glutatona) que possa ser utilizado para processos subsequentes (Jez, 2019). As primeiras etapas na síntese de compostos orgânicos contendo enxofre começam com a ativação e redução do sulfato, um processo crucial para a síntese do aminoácido cisteína (Taiz et al., 2017). As três enzimas envolvidas na via de assimilação do enxofre - ATP sulfúrilase, adenosina-5'-fosfosulfato (APS) redutase e sulfito redutase - trabalham em sequência para criar a molécula de alta energia APS e, em seguida, reduzem essa molécula para liberar sulfito, que é finalmente convertido em sulfeto (Jez et al., 2019; Koprivova & Kopriva, 2016). Posteriormente, o sulfeto pode, então, ser incorporado em um esqueleto de aminoácido utilizado para a síntese de cisteína (Takahashi et al., 2011) (Figura 3).



**Figura 3.** Via de biossíntese da cisteína e glutatona nas plantas a partir da absorção do sulfato. Metabólitos (negrito), enzimas de redução e síntese (Itálico). Redução do sulfato em sulfeto, posteriormente a combinação do sulfeto com O-acetilserina para formar cisteína, juntando-se ao glutamato para formar γ-glutamilcisteína por fim formação da Glutatona pela adição da glicina. **Fonte:** Adaptado de Jez, 2019.

A cisteína serve como uma fonte de enxofre reduzido para muitos metabólitos essenciais, como a glutatona e metionina (Kopriva, 2019; Jez, 2019). Além do aminoácido essencial metionina, diversos metabólitos de enxofre vegetal, como os glucosinolatos e seus derivados em espécies de Brassicaceae, são ingredientes importantes na dieta humana, sendo responsáveis por sabores e aromas distintos, inclusive a serem

reconhecidos como compostos benéficos à saúde (Traka & Mithen, 2009).

Outro metabólito importante que o enxofre desempenha é a síntese de hormônios importantes para as plantas. Depois que a cisteína e a metionina são sintetizadas, o enxofre pode ser incorporado a proteínas e vários outros compostos, como a acetil-CoA e a S adenosilmetionina, sendo este último fundamental para a

produção de etileno (Taiz et al., 2017). Além disso, Batool et al. (2018) destacam a importância da cisteína na biossíntese do ácido abscísico e subsequente fechamento estomático implicando que a nutrição e o metabolismo do enxofre são importantes para as relações hídricas das plantas.

Dessa maneira, o enxofre está intimamente ligado à produção de hormônios vegetais como etileno e ácido abscísico, essenciais para o crescimento, desenvolvimento e defesa com resposta ao estresse das plantas.

#### Extração e Exportação de Enxofre

Com o aumento da produtividade agrícola, a demanda por macronutrientes segue a mesma tendência, portanto, é essencial reavaliar a extração e partição de nutrientes em culturas de altos rendimentos para otimizar práticas de adubação (Oliveira et al., 2019). A extração de nutrientes depende da produtividade obtida e do acúmulo de nutrientes nos grãos e em outras partes da planta (Von Pinho et al., 2009). Desta forma, é necessário repor para as plantas quantidades de nutrientes que foram

extraídos, por meio de práticas de adubação (Oliveira et al., 2019).

Segundo Prado (2020), a extração total de S ocorre em função do teor na planta e da quantidade acumulada na matéria seca, dependendo da produção obtida que, por sua vez, depende da espécie, da variedade/híbrido, da disponibilidade no solo, do manejo da cultura, entre outros. As quantidades de S extraídas pelos vegetais superiores variam de 0,002 a 1,8% na matéria seca. De modo geral, a extração de enxofre pelos vegetais, ocorre na seguinte ordem decrescente: hortaliças > algodão > leguminosas > cereais e gramíneas (Vitti et al., 2018).

Conforme apresentado por Prado (2020), a extração total de enxofre variou de 8 (trigo) até 45 Kg/há (cana-de-açúcar), considerando a produção obtida em um hectare. Entretanto, em valores absolutos de extração total de enxofre, é possível notar alta exigência do feijoeiro e algodoeiro, e baixa exigência das gramíneas (cana-de-açúcar, milho, trigo e arroz), com valores de 25-26 e 0,5-4,0 Kg para cada tonelada de grãos produzido, respectivamente (Tabela 1).

**Tabela 1.** Exigências de enxofre das principais culturas (Malavolta et al., 1997).

| Cultura        | Parte da planta        | Matéria seca produzida | S               |       | S Exportado | S requerido para produção de 1 t de grãos |
|----------------|------------------------|------------------------|-----------------|-------|-------------|---|
|                |                        |                        | Acumulado       | Total |             |   |
|                |                        | t/ha                   | Parte da planta | Kg/ha | Kg/ha       | Kg/t                                      |
| Algodoeiro     | Reprodutiva            | 1,3                    | 10              | 32,05 | 7,7         | 25  |
|                | Vegetativa             | 1,7                    | 22              |       |             |   |
|                | Raiz                   | 0,5                    | 0,5             |       |             |   |
| Soja           | Grãos                  | 3                      | 6               | 23    | 2,0         | 7,7                                       |
|                | Ramas                  | 6                      | 17              |       |             |   |
| Feijão         | Vagem                  | 1                      | 10              | 26    | 10,0        | 26  |
|                | Caule                  | 0,4                    | 4               |       |             |   |
|                | Folhas                 | 1,2                    | 11              |       |             |   |
|                | Raiz                   | 0,1                    | 1               |       |             |   |
| Milho          | Grãos                  | 9                      | 11              | 19    | 1,2         | 2,1                                       |
|                | Restos culturais       | 6,5                    | 8               |       |             |   |
| Arroz          | Grãos                  | 3                      | 5               | 12    | 1,7         | 4   |
|                | Colmos                 | 2                      | 3               |       |             |   |
|                | Folhas                 | 2                      | 1               |       |             |   |
|                | Casca                  | 1                      | 1               |       |             |   |
|                | Raiz                   | 1                      | 2               |       |             |   |
| Trigo          | Grãos                  | 3                      | 3               | 8     | 1,0         | 2,7                                       |
|                | Palha                  | 3,7                    | 5               |       |             |   |
| Cana-de-açúcar | Colmos                 | 100                    | 25              | 45    | 0,25        | 0,5                                       |
|                | Folhas                 | 25                     | 20              |       |             |   |
| Cafeeiro       | Grãos (coco)           | 2                      | 3               | 27    | 1,5         | 13,5                                      |
|                | Tronco, ramos e folhas |                        | 24              |       |             |   |

Fonte: Prado (2020). Adaptado pelos autores.

Conforme a tabela acima, a taxa de exportação das culturas em estudo, com os produtos da colheita (grãos, colmos, partes vegetativas), atingiu em média 58%, e o algodoeiro e o feijoeiro são os que mais exportam 7,7 e 10 Kg/t produzida, respectivamente. Essa exportação do enxofre, é caracterizada pela retirada do elemento da lavoura, por meio do produto da colheita (Prado, 2020).

De maneira geral, as culturas leguminosas tendem a exigir maiores quantidade de enxofre do que as gramíneas, devido apresentarem teores

mais elevados de proteínas. Entretanto, em alguns casos, as gramíneas podem apresentar repostas a adubação sulfatada de forma semelhante as leguminosas, em razão da grande produção de matéria vegetal, associada a baixa disponibilidade de nutriente no solo (Novais et al., 2007).

De acordo com Vitti et al. (2018), mencionam que em culturas de interesse agrônomo o enxofre é extraído em quantidades superiores às de fósforo (P), no qual, as hortaliças crucíferas apresentam elevada extração do elemento (Tabela 2).

**Tabela 2.** Quantidade de enxofre extraído por diversas culturas (Malavolta *et al.*, 1976; Kamprath; Till, 1983).

| Cultura         | S extraído (Kg/ha) | Produção (t/ha) |
|-----------------|--------------------|-----------------|
| Algodão         | 33                 | 1,3             |
| Cana-de-açúcar  | 58                 | 100             |
| Feijão          | 25                 | 1,0             |
| Trigo           | 22                 | 5,4             |
| Milho           | 34                 | 11,2            |
| Soja            | 28                 | 4,0             |
| Café            | 27                 | 2,0 (coco)      |
| Abacaxi         | 41                 | 50.000 pés      |
| Amendoim        | 24                 | 4,5             |
| Colonião *      | 45                 | 23,0            |
| Capim-pangola * | 52                 | 26,4            |
| Napier *        | 75                 | 25,0            |
| Alfafa *        | 24                 | 5,0             |
| Couve-flor      | 21                 | 9,2             |
| Repolho         | 64                 | 84              |
| Ervilha         | 19                 | 100.000 plantas |
| Espinafre       | 6                  | 22.222 plantas  |
| Nabo            | 13                 | -               |

(\*) Plantas forrageiras. **Fonte:** Vittii *et al.*, 2018. Adaptado pelos autores.

As crucíferas são alimentos funcionais, com grande quantidade de compostos nitrogenados com enxofre em sua estrutura, conhecidos como glucosinolatos, que são ativadores de enzimas responsáveis pela desintoxicação do fígado, e por isso, protegem o organismo contra carcinogênese e mutagênese (Mithen *et al.*, 2000).

É importante salientar, que por meio do lançamento de novas cultivares e híbridos no mercado, a exigência nutricional por enxofre poderá aumentar, também levando em consideração o manejo adotado e doses mais elevadas de fertilizantes (Prado, 2020).

Dessa forma, Oliveira *et al.* (2020), destaca que a importância do S para as plantas é imprescindível, principalmente por sua presença essencial nos aminoácidos sulfurados cistina e metionina nas proteínas vegetais. Entretanto, o uso do solo de forma incorreta, o uso desenfreado de corretivos e fertilizantes concentrados com ausência de S, e as exportações deste elemento pelas colheitas reduzem a sua disponibilidade para as plantas (Oliveira *et al.*, 2020).

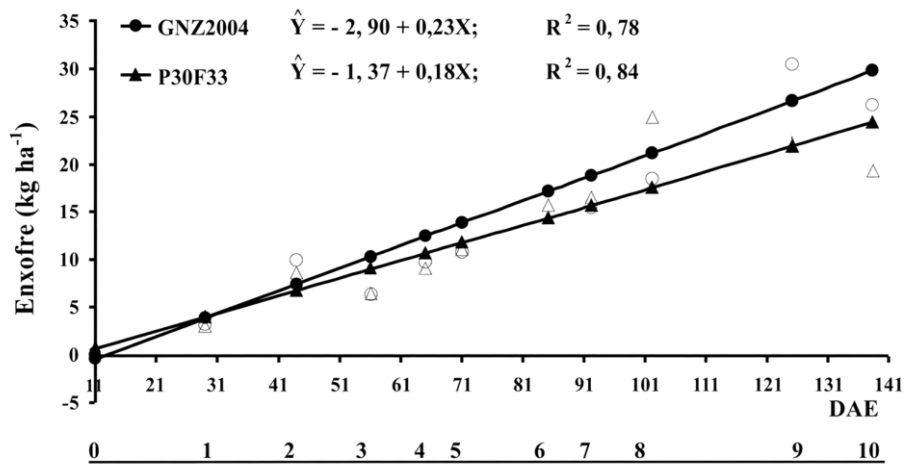
#### Marcha de Absorção

A determinação da absorção e do acúmulo de nutrientes durante as diferentes fases do desenvolvimento da planta, é importante para identificar os momentos em que são mais exigidos durante o ciclo da cultura e a distribuição dos nutrientes nas diferentes estruturas da planta, permitindo um manejo adequado da fertilização (Silva *et al.*, 2017).

Ao avaliar duas cultivares híbridas de milho, Von Pinho *et al.* (2009) notaram que a acumulação de enxofre apresentou comportamento linear durante o ciclo da cultura (Figura 4). Segundo os autores, o máximo acúmulo de enxofre ocorreu no estágio fenológico 9, para os dois híbridos (aos 125 dias), com valores superiores a 30 Kg/ha para o GNZ2004 e superiores a 22 Kg/ha para o P30F33, com uma redução nos totais de enxofre acumulado até à maturidade fisiológica (estádio fenológico 10), acumulando macronutrientes em sua parte aérea na seguinte ordem decrescente: N>K>P>Ca>Mg>S.

A extração de enxofre pela planta de milho é pequena e varia de 15 a 30 Kg/ha, para uma produção em torno de 5 a 7 t/há (Oliveira *et al.*, 2020). O S é um elemento com pouca mobilidade no interior das plantas, e, dessa forma, praticamente não há redistribuição da concentração do nutriente da planta (folhas e pendão) para a espiga (Cruz *et al.*, 1996; Borin *et al.*, 2010).

Cavalcante *et al.* (2018) ao estudarem sorgo biomassa (*Sorghum bicolor* L.), notaram que o acúmulo total de S ocorreu de forma lenta até o estágio fenológico V9, de modo que as maiores taxas de acúmulo ocorreram entre 33 e 63 dias após a emergência, no período que coincidiu com o maior acúmulo de matéria seca (Figura 5). Neste intervalo de 30 dias, a colheita passou de 8,4 Kg/ha para 60,7 Kg/ha de S, representando um acúmulo de 52,3 Kg/ha (Cavalcante *et al.*, 2018).



### Estádios fenológicos

Figura 4. Acumulação total de enxofre, em dois híbridos de milho, em função dos estádios fenológicos (dias após a emergência). Fonte: Von Pinho *et al.*, 2009.

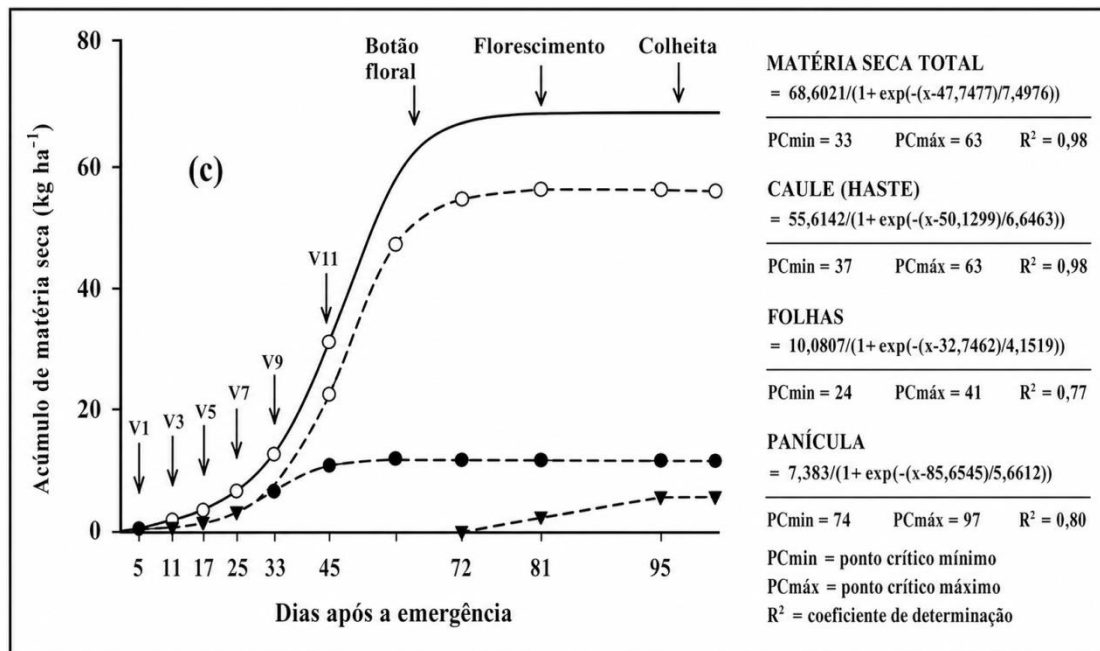
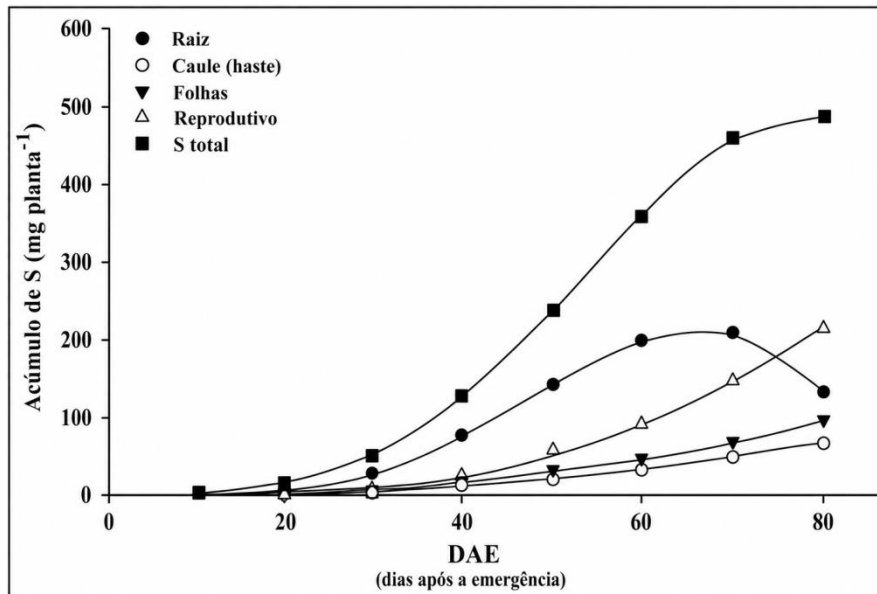


Figura 5. Acúmulo enxofre na parte aérea do sorgo biomassa, em função dos dias após a emergência. O ponto mínimo de curvatura (PCmin) indica o início de ganhos significativos no acúmulo de S. O ponto máximo de curvatura (PCmax) indica o momento em que o acúmulo do elemento começa a se estabilizar. Fonte: Cavalcante *et al.*, 2018.

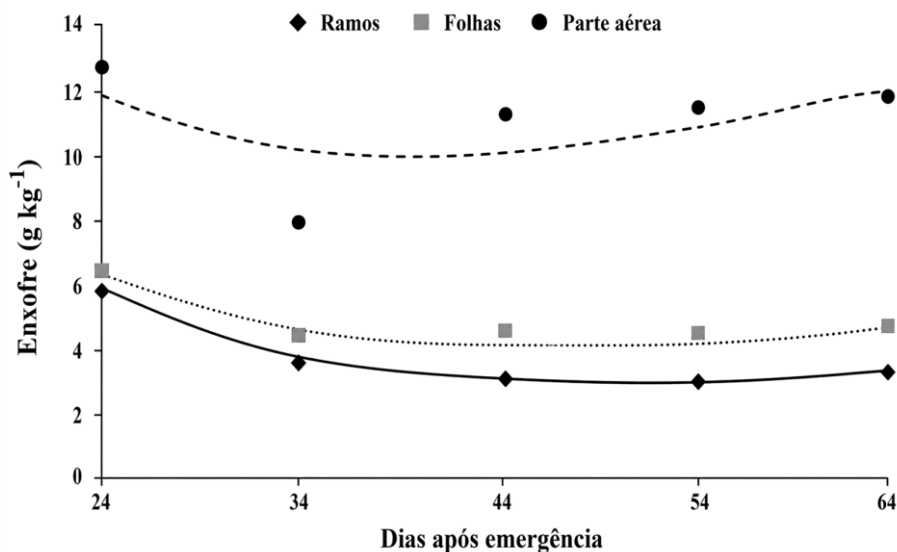
Tendo conhecimento que o S é um macronutriente essencial por ser incorporado em aminoácidos ou metabólitos contendo enxofre, sabe-se que ele desempenha um papel crucial para Cunha *et al.* (2020) ao avaliarem *Vigna unguiculata* sub sp. *sesquipedalis*, notaram que a fase de maior exigência nutricional da cultura é no início do florescimento e frutificação, e que remoção total de enxofre foi de 507,5 mg/planta (Figura 6). Apresentando maior percentual de alocação nas raízes, aos 10 dias após a emergência, e atingiu

o crescimento das plantas e adaptação ao estresse (Forzani *et al.*, 2018), o que pode explicar a maior demanda por S no período de maior acúmulo de matéria seca.

77% no final do ciclo (70 dias após a emergência). Nos órgãos reprodutivos (vagem, flor e grãos) aos 80 DAE foram observados taxas de máximo acúmulo de S, devido a intensa redistribuição do S das raízes às partes reprodutiva, e uma redução de até 47% no acúmulo total (Cunha *et al.*, 2020).



**Figura 6.** Acúmulo de enxofre (S), durante o ciclo do feijão-de-jarda cultivado em vasos contendo solução nutritiva. DAE = dias após a emergência. **Fonte:** Cunha *et al.*, 2020.



**Figura 7.** Acúmulo de enxofre nos ramos ( $\hat{Y}_R = 12,6160 - 0,3649x + 0,0035x^2$ ;  $R^2 = 0,8923^*$ ), folhas ( $\hat{Y}_F = 12,0492 - 0,3261x + 0,0033x^2$ ;  $R^2 = 0,8275^*$ ) e parte aérea ( $\hat{Y}_{Pa} = 17,7100 - 0,3657x + 0,0044x^2$ ;  $R^2 = 0,2467^*$ ), da cultivar de melancia Crimson Sweet. **Fonte:** Almeida *et al.*, 2012.

Para a cultura da melancia, segundo Almeida *et al.* (2012) o enxofre foi o quinto macronutriente mais requerido, no qual, durante o período compreendido entre 34 e 64 DAE ocorreu incremento no acúmulo de S pela parte aérea e seus teores elevaram de 7,87 g/Kg(34 DAE) para 11,86 g/Kg(64 DAE) (Figura 7). Durante o período de frutificação (44 a 64 DAE) os ramos e folhas acumularam menor quantidade de S do que no período de desenvolvimento vegetativo (34 DAE), no entanto, entre 44 e 64 DAE, ocorreu demanda

crescente pelos frutos por S, acumulando, nesse intervalo, 3,88 g/Kg(64 DAE).

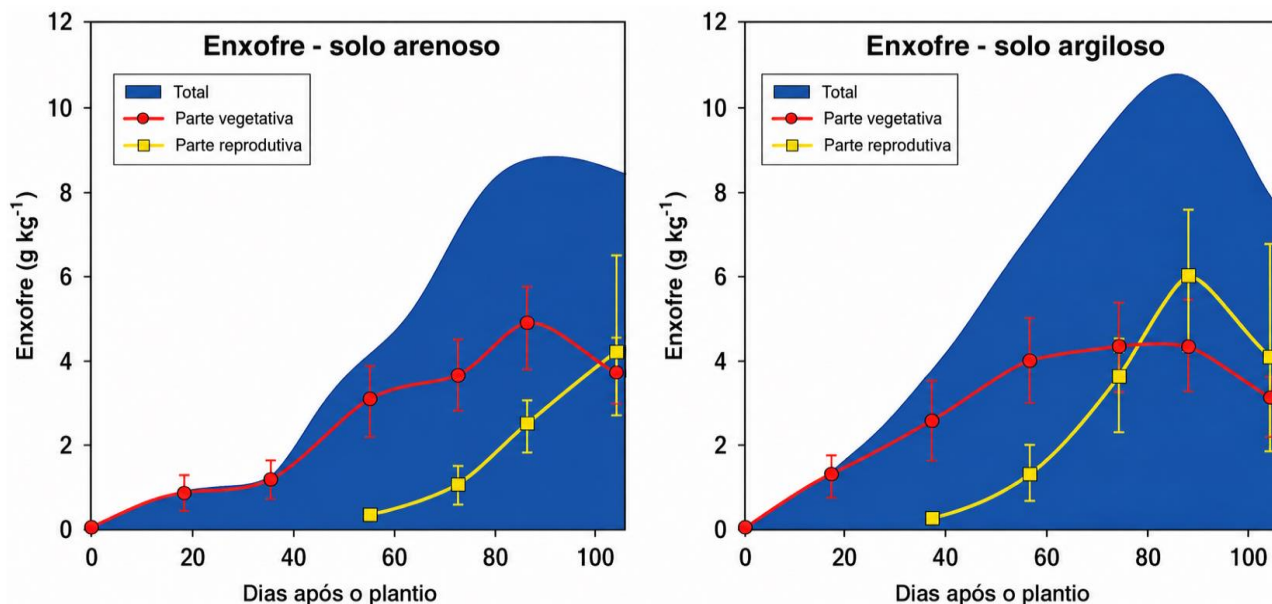
Entre 24 e 64 DAE, constatou-se que ramos e folhas acumularam, respectivamente: 36,1% (4,00 g/Kg) e 43,4% (4,81 g/Kg) da quantidade total de S acumulada pela planta (11,08 g/Kg<sup>-1</sup> de S). Já os frutos acumularam 32,3% (3,77 g/Kg) do teor médio total de S acumulado pela planta entre 44 e 64 DAE (11,67 g/Kg) (Almeida *et al.*, 2012).

Desta forma, é possível notar a relação direta existente entre os órgãos da planta que possuem atuação como fonte e/ou dreno de

nutrientes, onde inicialmente os órgãos vegetativos atuam como dreno de nutrientes e, posteriormente, se tornam fonte para órgãos reprodutivos (Pegoraro et al., 2014).

Quanto ao tipo de solo, este também pode apresentar influência no acúmulo de S pelas plantas. A pesquisa realizada por Severino et

al.(2021), demonstrou que a extração de enxofre na lavoura de mamona (*Ricinus communis*) atingiu o valor máximo de 9 Kg/ha em solo arenoso e 11 Kg/há em solo argiloso, no qual, durante a fase de enchimento de grãos, a maior parte do S foi translocado para a parte reprodutiva (Figura 8).



**Figura 8.** Acúmulo de enxofre (Kg/ha<sup>-1</sup>) na cultura de mamona, em dois tipos de solos (arenoso e argiloso), em lavoura comercial. **Fonte:** Severino et al., 2021.

Solos argilosos com altos teores de óxidos de ferro apresentam grande capacidade adsorção de  $SO_4^{2-}$ , o que diminui a movimentação do enxofre no solo, porém, em solos arenosos a movimentação de  $SO_4^{2-}$  é maior e, com isso, este pode ser perdido por percolação, além disso, solos arenosos apresentam baixos teores de matéria orgânica, o que influencia em reservas menores de S (Stipp; Casarin, 2010).

Diante do exposto, para que se tenha a maximização da conversão do nutriente aplicado em adubações, é necessário atender em termos quantitativos, todos os estádios de crescimento e desenvolvimento da planta, para que se possa atingir a produção máxima esperada para cada cultura, ou seja, atender às exigências nutricionais específicas de cada cultura (Prado, 2008).

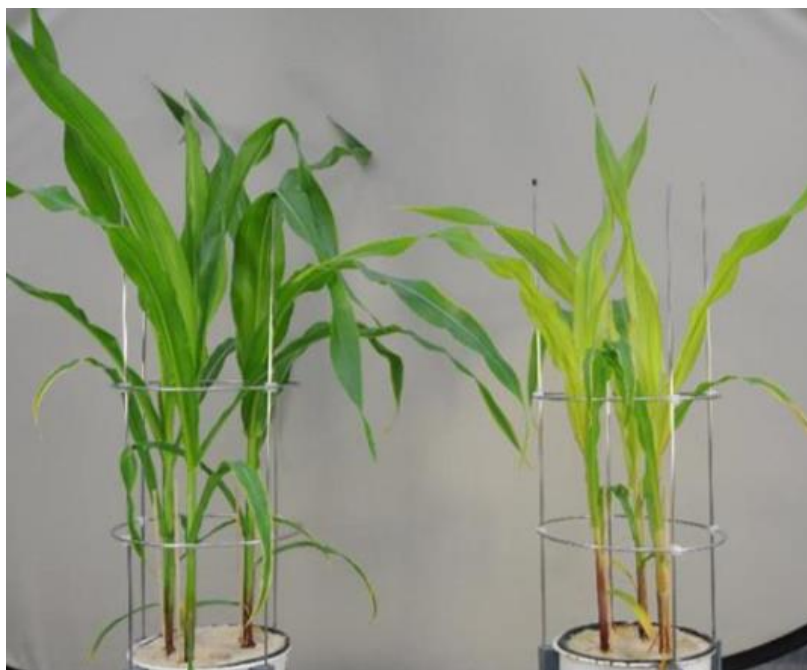
Entretanto, o entendimento de marcha de absorção baseando-se apenas em dias após o plantio (DAP) ou em dias após a emergência (DAE), pode levar a equívocos de interpretação, devido ao fato, de que diferentes cultivares podem apresentar variações quanto ao tempo para a ocorrência de eventos fisiológicos nas plantas e também devido a variações na idade cronológica com a região de cultivo e época de semeadura (Von Pinho et al.,

2009). Desta forma, novos estudos sobre a marcha de absorção de nutrientes em diferentes culturas agrícolas podem revelar outras épocas de aplicação e quantidades diferentes de nutrientes requeridas pelas plantas.

#### Sintomas de Deficiência Nutricional

O enxofre (S) como nutriente é essencial para o desenvolvimento de plantas e fundamental na formação da clorofila, pois participa do metabolismo dos carboidratos, desta forma, plantas com deficiência de enxofre apresentam diminuição da fotossíntese e geralmente, a deficiência que ocorre na lavoura somente é visível quando já está severa (Reis et al., 2015).

As plantas absorvem o enxofre na forma de sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), o que atua na manutenção da cor verde presente nas folhas e na estimulação do crescimento da planta (Kerbaui, 2019). Portanto, os sintomas de deficiência nutricional são de fácil visualização, a deficiência de enxofre se manifesta, principalmente, por clorose de cor verde-amarela e/ou verde pálido generalizada nas folhas, resultado da redução na produção de clorofila (Kerbaui, 2019) (Figura 9).



**Figura 9:** Demonstração de deficiência do Enxofre (direita) na cultura do milho. **Fonte:** Yara Brasil S.A, 2024.

Com base na figura acima, podemos observar duas plantas da cultura do milho, a de lado esquerdo demonstra a planta de maneira comum, sem sintomas aparentes, saudável. A de lado direito apresenta o seu crescimento reduzido e clorose de cor amarelo esverdeado generalizado ao longo das folhas, o que indica sintomas de deficiência nutricional do enxofre. As diferenças de coloração e vigor entre as plantas podem indicar uma variação nas condições de cultivo e/ou carência do elemento no solo, em decorrência que o estado de deficiência do S se manifesta, frequentemente, em solos arenosos e com baixo teor de matéria orgânica (Novais, *et al.*, 2007).

As plantas que apresentam deficiência de enxofre podem ser facilmente confundidas com aquelas que apresentam deficiência de nitrogênio (N), uma vez que ambos os elementos desempenham funções semelhantes nas plantas (Castro, 2023). A ausência ou o excesso de qualquer um desses nutrientes pode resultar em alterações semelhantes nos tecidos vegetais, manifestando sintomas visuais similares (Hanselet *et al.*, 2021). Porém, o S é imóvel nas plantas ou com baixa mobilidade no floema, por isso, seus sintomas são visualizados em folhas novas, diferente da deficiência do N que se inicia nas folhas mais velhas (Castro, 2023).

O autor ainda comenta que, como esse sintoma tende a aparecer nas folhas mais jovens, o enxofre não é facilmente redistribuído dos tecidos mais velhos. Contudo, Kerbauy (2019), discorre que em algumas espécies, a clorose pode afetar tanto as folhas novas quanto as mais antigas ao mesmo tempo. Além disso, outros sinais incluem o surgimento de folhas menores e mais estreitas, a

morte prematura das folhas inferiores e um crescimento geral mais lento (Kerbauy, 2019).

A deficiência de enxofre, ocasiona sérias consequências no metabolismo do N, que é fortemente afetado pela concentração de S na planta (Marschner, 2012). A interação N x S no metabolismo não se restringe apenas à síntese de proteínas, mas também pode ocasionar menor atividade da enzima redutase do nitrato sob condições de S limitante, o que culmina em incremento nas concentrações de nitrato nos tecidos das plantas (Giordano *et al.*, 2000; Prosser *et al.*, 2001).

Em estádios mais avançados, a deficiência de S além de causar clorose, ocasiona hastes e colmos mais curtos e crescimento reduzido nas plantas, devido a menor síntese de proteínas e maior relação N solúvel/N proteico, ou seja, menor atividade das enzimas redutase do nitrato e de nitrito, desta forma, não incorporando o N mineral (solúvel) em N proteico (Vitti *et al.*, 2018).

### Conclusões

O enxofre é um macronutriente essencial que contribui para processos fundamentais, como síntese de proteínas, ativação de enzimas e formação de clorofila, todos vitais para a saúde e produtividade das plantas.

Conhecer as necessidades das plantas por esse nutriente pode levar a práticas de fertilização mais eficiente, minimizando os impactos ambientais ao evitar a aplicação excessiva ou insuficiente. Além disso, otimizar o manejo do enxofre pode aumentar a produtividade e a qualidade das culturas, atendendo às crescentes demandas por alimentos de forma sustentável.

## Referências

- ALMEIDA, E. I. B.; DE MEDEIROS CORRÊA, M. C.; NÓBREGA, G. N.; PINHEIRO, E. A. R.; LIMA, F. F. Crescimento e marcha de absorção de macronutrientes para a cultivar de melancia Crimson Sweet. *Revista Agro@mbiente on-Line*, v. 6, n. 3, p. 205-214, 2012.
- ALVAREZ V. V.H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C.H.; PEREIRA, N.F. Enxofre. In: NOVAIS, R.F. et al. (Eds.). *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 595-644, 2007.
- BATOOL, S.; USLU, V.V.; RAJAB, H.; AHMAD, N.; WAADT, R.; GEIGER, D.; WIRTZ, M. Sulfate incorporated into cysteine to trigger ABA production and stomatal closure. *The Plant Cell*, v. 30, n. 12, p. 2973-2987, 2018.
- BORIN, A. L.D.C.; LANA, R.M.Q.; PEREIRA, H.S. Absorção, acúmulo e exportação de macronutrientes no milho doce cultivado em condições de campo. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 34, n. spe, p. 1591-1597, dez. 2010.
- BOURSCHEIDT, M. L. B. et al. Estratégias de fornecimento de nitrogênio em pastagens: fertilizante mineral, inoculante bacteriano e consórcio com amendoim forrageiro. *Scientific Electronic Archives*, v. 12, n. 3, p. 137-147, 2019.
- CARVALHO, H. W.P.; MOREIRA, L. A. *Nutrição Mineral de Plantas*. 1 ed. Piracicaba, SP. 2023.
- CASTRO, F.F.G.; LUCIO, J.A.L.; SANDOVAL, M.F.Q.; CABEZAS, M.A.G. Nutrição à base de nitrogênio, enxofre e magnésio no rendimento do milho (*Zea mays* L.): Nitrogen, Sulfur and Magnesium based nutrition on corn (*Zea mays* L.) yield. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, Curitiba, v. 6, n. 4, p. 3533-3550, 2023.
- CAVALCANTE, T.J.; CASTOLDI, G.; RODRIGUES, C.R.; NOGUEIRA, M.M.; ALBERT, A.M. Marcha de absorção de macro e micronutrientes em sorgo biomassa. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 48, n. 4, p. 364-373, 2018.
- CÉSAR, F.R.C.F. Efeito de enxofre elementar na eficiência de fosfatos naturais. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2012.
- CHAUDHARY, S.; SINDHU, S.S.; DHANKER, R.; KUMARI, A. Microbes-mediated sulphur cycling in soil: Impact on soil fertility, crop production and environmental sustainability. *Microbiological Research*, v. 271, 2023.
- Corioletti, N. S. D., Corioletti, S., & da Silva, V. L. (2021). Influência da adubação bórica na cultura do feijoeiro. *Scientific Electronic Archives*, 14(5), 89-98. <https://doi.org/10.36560/14520211244>
- COSTA, A. R. Nutrição mineral em plantas vasculares. Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora. 2014. ISBN: 978-989-97060-9-5.
- CRUZ, J. C.; SILVA, A. F.; MANTOVANI, B. H. M.; PAIVA, E.; COUTO, L.; SCHAUN, N. M.; MAGNAVACA, M. *Recomendações técnicas para o cultivo do milho*. 2.ed. Brasília: Embrapa-SPI, p. 204, 1996.
- CUNHA, A. L. B. D.; CHAVES, F. C. M.; KANO, C.; BRAGA, I. G.; OLIVEIRA, M. R. D. Nutrient uptake rate for yardlongbean. *Horticultura Brasileira*, v. 38, n. 2, p. 175-184, 2020.
- DA COSTA LEITE, Thiago Rodrigues et al. Produção de cultivares de rúcula (*Eruca sativa*) sob diferentes malhas de sombreamento e campo aberto. *Scientific Electronic Archives*, v. 15, n. 5, 2022.
- DE JESUS, Felipe Queiroz; GOMES, Marcelo Barcelo; DA SILVA, Valéria Lima. Resposta morfológica e produtiva do rabanete submetido à adubação fosfatada. *Scientific Electronic Archives*, v. 15, n. 11, 2022.
- DE OLIVEIRA, João Ricardo et al. Ocorrência de plantas daninhas, nutrição e desenvolvimento vegetativo do abacaxizeiro em diferentes arranjos espaciais e manejos do solo. *Scientific Electronic Archives*, v. 15, n. 6, 2022.
- DOMINGOS, C. S.; SILVA LIMA, L. H. S.; BRACCINI, A. L. *Nutrição mineral e ferramentas para o manejo da adubação na cultura da soja*. Scientia Agraria Paranaensis. Marechal Cândido Rondon, 2015.
- DOS SANTOS PALAVICINI, Amanda Louise et al. Teores de nutrientes na alface com aplicação de doses crescentes de nitrogênio em quatro cultivares. *Scientific Electronic Archives*, v. 14, n. 4, 2021.
- DUARTE, Jefersson Pereira; RUFF, Oilhan Jonas; DOS SANTOS, Carlos Leandro Rodrigues. Inoculação de milho com inoculante à base de *Azospirillum brasilense* sob doses de nitrogênio em solo arenoso. *Scientific Electronic Archives*, v. 14, n. 8, 2021.
- FORZANI, C.; DUARTE, G. T.; MEYER, C. The plant target of rapamycin kinase: a connector between sulfur and growth. *Trends in Plant Science*, v. 23, n. 6, p. 472-475, 2018.
- GIORDANO, M.; PEZZONI, V.; HELL, R. Strategies for the allocation of the resources under sulfur limitation in the green alga *Dunaliella salina*. *Plant Physiology*, Rockville, v. 124, p. 857-864, 2000.
- Guerreiro, J. C., Silva, G. B., Azevedo, A. P., Espessato, R. R., Padovan, A. T., Leite, F., & Ferreira Filho, P. J. (2017). Control of *Dichelops melacanthus* with insecticides associated with sulphur applied in different times in corn. *Scientific*

*Electronic Archives*, 10(1), 67–74.  
<https://doi.org/10.36560/1012017360>

HANSEL, F. B.; RODRIGUES, M.; ZABINI, A. V.; ZAVASCHI, E.; LAZZARINI, P.; MURATE, R.; BONINI, F. G. Nutrição mineral como aliada das plantas na tolerância a estresses ambientais. *Jornal Informações Agrônomicas - Nutrição de Plantas*, n. 9, 2021.

HARTMANN, T.; MULT, S.; RENNENBERG, H.; HERSCHBACH, C. Leaf adent differences in sulfur assimilation and allocation in poplar (*Populus tremula* x *P. Alba*). *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 51, p. 1077-1088, 2006.

JEZ, J. M. Structural biology of plant sulfur metabolism: from sulfate to glutathione. *Journal of Experimental Botany*, v. 70, n. 16, p. 4089-4103, 2019.

JONES, R.; OUGHAM, H.; THOMAS, H.; WAALAND, S. Mineral nutrient acquisition and assimilation. In: JONES, R.; OUGHAM, H.; THOMAS, H.; WAALAND, S. *The Molecular Life of Plants*. Oxford: Wiley-Blackwell, p. 486, 2013.

KAMPRATH, E. J.; TILL, A. R. Sulfur cycling in the tropics. In: BLAIR, G. J. & TILL, A. R., (Eds.). *Sulfur in South-East Asian and South Pacific agriculture*. Armidale, The Australian Development Assistance Bureau & The Sulphur institute, 1983. p.1-14.

KERBAUY, G. B. *Fisiologia Vegetal*. 3 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2019.

KERTESZ, M.A.; MIRLEAU, P. The role of soil microbes in plant sulphur nutrition. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 55, p. 1939-1945, 2004.

KOPRIVA, S; MALAGOLI, M; TAKAHASHI, H. Sulfur nutrition: impacts on plant development, metabolism, and stress responses. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 70, No. 16 pp. 4069–4073, 2019. doi:10.1093/jxb/erz319

KOPRIVOVA, A; KOPRIVA, S. Sulfation pathways in plants. *Chemico-biological interactions*, v. 259, p. 23-30, 2016.

LARSON, M.; PUERVES, J. V.; CLARCKSON, D. T. Translocation and cycling through roots of recently absorbed nitrogen and sulfuri wheat ( *Triticum aestivum* ) during vegetative and generative growth. *PhysiologiaPlntarum*, Copenhagen, v. 82, p. 345-352, 1991.

LI, Q.; GAO, Y; YANG, A. "Sulfur Homeostasis in Plants" *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. no. 23: 8926. <https://doi.org/10.3390/ijms21238926>.

MALAVOLTA, E. *Manual de Nutrição mineral de Plantas*. Centro de Energia nuclear na Agricultura

Universidade de São Paulo Piracicaba, SP. Editora Agrônômica Ceres Ltda São Paulo, 2006.

MALAVOLTA, E. *Manual de química agrícola: Nutrição de plantas e fertilizantes do solo*. São Paulo, Editora Agrônômica Ceres, 1976.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. 3. ed. London: Elsevier, 2012, 651p.

MITHEN, R. F.; DEKKER, M.; VERKERK, R.; RABOT, S.; JOHNSON, I. T. The nutritional significance, biosynthesis and bioavailability of glucosinolates in human foods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 80, n. 7, p. 967-984, 2000.

NIKIFOROVA, V. J.; BIELECKA, M.; GAKIERE, B.; KRUEGER, S.; RINDER, J.; KEMPA, S.; HOEFGEN, R. Effect of sulfur availability on the integrity of amino acid biosynthesis in plants. *Amino Acids*, New York, v. 30, p. 173-183, 2006.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H., BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

OLIVEIRA, R. J.; SILVA, R. C. D.; SILVA JÚNIOR, G. S.; MUNIZ, P. H. P. C.; PELÁ, A. Oxidação de enxofre elementar em diferentes fontes e doses de fertilizantes / Elementary sulfuroxidation in different sources and doses of fertilizers. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 5, p. 27735–27745, 2020.

OLIVEIRA, T. F.; OLIVEIRA, V. J. B.; CLEMENTE, J. M.; AQUINO, L. A.; REIS, M. R.; FERNANDES, F. L. Extração e exportação de macronutrientes em lavouras de milho de alta produtividade. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 12, n. 3, p. 837-854, 2019.

PEGORARO, R. F.; OLIVEIRA, D.; MOREIRA, C. G.; KONDO, M. K.; PORTUGAL, A. F. Partição de biomassa e absorção de nutrientes pelo feijoeiro comum. *Revista Caatinga*, v. 27, n. 3, p. 41-52, 2014.

PEREIRA, C. S.; FREITAS, A. A.; CHAPLA, M. V.; LANGE, A. Doses de potássio com a presença de enxofre na cultura da soja. *Global science and technology*, v. 9, n. 1, 2016.

PEREIRA, Cassiano Spaziani et al. Avaliação de doses de enxofre em cultivares de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). *Scientific Electronic Archives*, v. 14, n. 10, 2021.

PRADO, R. M. *Nutrição de plantas*. 2º.ed. São Paulo: Editora Unesp. p. 121, 2020.

- PRADO, R. M. Nutrição de plantas. São Paulo: UNESP, 2008.
- PROSSER, I.M.; PURVES, J.V.; SAKER, L.R.; CLARKSON, D.T. Rapid disruption of nitrogen metabolism and nitrate transport in spinach plants deprived of sulphate. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 52, p. 113-121, 2001.
- REETZ, H. F. Fertilizantes e seu uso eficiente. São Paulo: ANDA, 2017.
- REIS, P. R.; REBELLES, P. P. R.; PEREIRA, M. C.; LISKA, G. R.; MORAIS, A. R. D. Eficácia do enxofre aplicado via solo no controle da cigarrinha *Quesada gigas* (Olivier) em cafeeiro. *Coffee Science*, Lavras, v. 10, n. 4, p. 527 – 536, 2015.
- SEVERINO, L. S.; SCHLICK, G. D. S.; DE PAULA, M. P.; DE PAULA, T. I. S.; SOUZA, E. C. S. Marcha de absorção de macronutrientes na mamoneira híbrida de porte baixo em Mato Grosso. *Campina Grande: Embrapa Algodão*, p. 7-8, 2021.
- SILVA, E. B.; FERREIRA, E. A.; PEREIRA, G. A. M.; SILVA, D. V.; OLIVEIRA, A. J. M. Absorção e crescimento de nutrientes plantas de amendoim. *Revista Caatinga*, v. 30, pág. 653–661, 2017.
- SILVA, M. L. S.; SILVA, M. A. D.; TREVIZAM, A. R. Influência do nitrogênio e enxofre na produção do feijoeiro. *Revista Agrogeoambiental*, v. 9, n. 3, 2017.
- STIPP, S.R.; CASARIN, V. A importância do enxofre na agricultura brasileira. *Informações agronômicas*, v. 129, n. 1, p. 14-20, 2010.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. – Porto Alegre: Artmed, 2017.
- TAKAHASHI, H.; KOPRIVA, S.; GIORDANO, M.; SAITO, K.; HELL, R. Sulfur assimilation in photosynthetic organisms: molecular functions and regulations of transporters and assimilatory enzymes. *Annual Review of Plant Biology*, v. 62, p. 157–184, 2011.
- TRAKA, M., MITHEN, R. Glucosinolates, isothiocyanates and human health. *Phytochemistry Reviews*, v. 8, p. 269–282, 2009.
- VITTI, G. C.; OTTO, R.; SAVIETO, J.; LIMA, E.; SANTOS, L. A. Nutrição Mineral de Plantas 2ª edição. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 376–397, 2018.
- VON PINHO, R. G.; BORGES, I. D.; PEREIRA, J. L. D. A. R.; REIS, M. C. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 8, p. 157-173, 2009.
- YARA BRASIL SA. Deficiência de enxofre no milho. Yara Brasil SA, 2024. Disponível em: <https://www.yarabrasil.com.br/nutricao-de-plantas/milho/deficiencias-milho/deficiencia-de-enxofre-milho/>. Acesso em: 27 out. 2024.