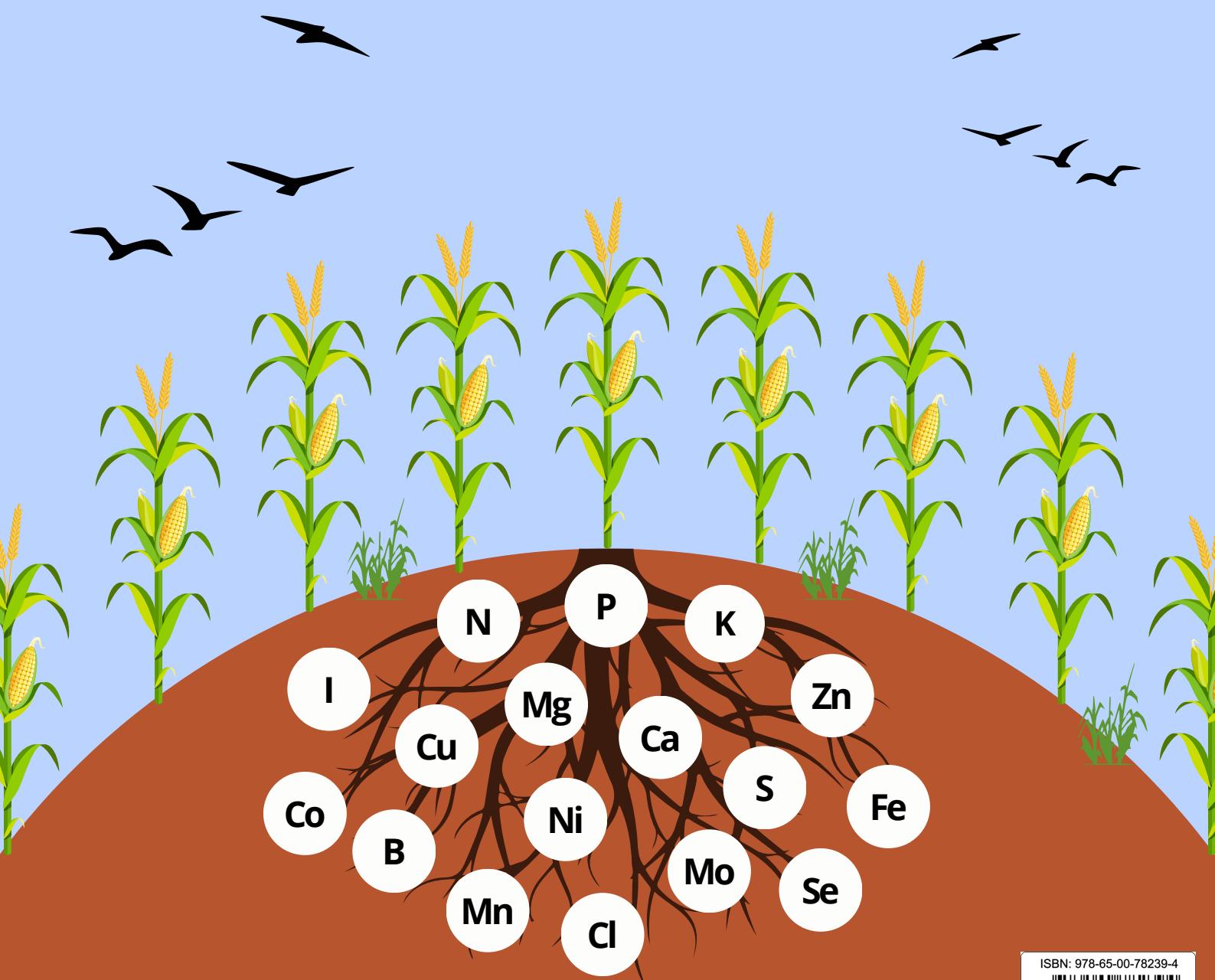


Nutrição Mineral de Plantas



Prefácio

Este trabalho surgiu na ideia de que o saber pode ser transmitido de forma eficiente, mostrando em linguagem escrita e visual a aplicabilidade prática da ciência. A brochura intitulada "Nutrição Mineral de Plantas" foi idealizada e escrita por membros do Grupo de Estudos de Fertilizantes Especiais e Nutrição (GEFEN - CENA/USP), contando com a participação de alunos de graduação, pós-graduação e professores.

O principal objetivo do grupo era desenvolver um conteúdo informativo em linguagem simples e compreensível, sem perder a qualidade conceitual. Esta meta foi cumprida com exatidão e esperamos que o leitor faça bom uso, usando-o para consultas ou até mesmo pesquisas, inspirando novas ideias aos envolvidos nesta área grandiosa que é a nutrição e fisiologia de plantas.

Edição:

Supervisão:

Prof. Dr. Hudson W.P. Carvalho, USP & UM6P - hudson@cena.usp.br

Dra. Lilian A. Moreira, UFPR - lilianmoreira@usp.br

Alunos de pós-graduação:

Vinicius Pires Rezende

Alunos de graduação:

Arthur Bernardes dos Santos

Felipe Sousa Franco

Gustavo Paparotto Lopes

Júlia Rossatto Brandão

Lucas Coan Perez

Luís Fernando Agostinho

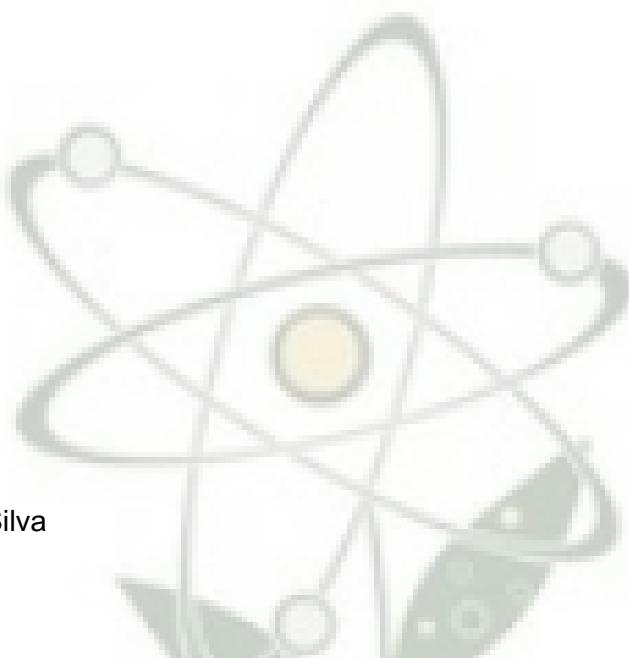
Laura Galvan Nuevo

Maria Eduarda Scorzoni

Nicolas Gustavo da Cruz da Silva

Samira Polezi Silva

Tiago Alexandre Rozinholli



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Nutrição mineral de plantas [livro eletrônico]. --

1. ed. -- Piracicaba, SP : Ed. dos Autores, 2023.

PDF

Vários autores.

Bibliografia.

ISBN 978-65-00-78239-4

1. Fertilizantes 2. Nutrição mineral 3. Plantas - Nutrição 4. Solos e nutrição de plantas 5. Solos - Manejo.

Resumo

A história da nutrição de plantas é iniciada em 1652 quando inicia-se o entendimento de que as plantas absorvem substâncias para se desenvolverem. O primeiro nutriente foi descoberto em 1772, o N, a lista cresceu ao longo da história até que em 1987 o ultimo elemento, o Ni, foi adicionado totalizando 14 nutrientes minerais. Atualmente estimamos que uma planta contem em média 90 % de água e 10 % de massa seca. A massa seca de uma planta é 93 % composta por C, H, e O, os demais 7 % são distribuídos de maneira não uniforme entre N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, B, Mn, Cu, Ni, Zn, Mo, Cl, alguns elementos benéficos e outros. A diferença entre nutriente e elemento benéfico pode ser simplificada entendendo que na ausência de um nutriente a planta não completa seu ciclo de vida, já na ausência de um elemento benéfico a planta completa seu ciclo, mas não obrigatoriamente com a máxima produtividade, principalmente em condições de estresse. Esses elementos, principalmente os nutrientes, são todos obtidos pelas plantas através da solução do solo, ar ou outros meios. Na solução do solo, principal fonte, estão devido ao processo de intemperismo ou suplementação pelo manejo de correção e adubação, sendo estas estratégias de grande impacto no desenvolvimento da agricultura. Atualmente a nutrição mineral de plantas é uma ciência sinérgica entre os conceitos fisiológicos, químicos, bioquímicos e de fertilidade do solo com foco em estudar e compreender como os nutrientes são absorvidos pelas plantas; como ocorre o transporte dos nutrientes a curta e longe distância nas plantas; porque, quando e como ocorre a redistribuição e assimilação dos nutrientes; e quais são os papéis que os nutrientes desempenham no metabolismo vegetal, explicitando como a má nutrição impacta no desenvolvimento e produtividade das culturas. Neste sentido um compilado da literatura foi realizado para apresentar as principais fontes de nutrientes e elementos benéficos, como estão no solo e são absorvidos e suas principais funções no desenvolvimento das plantas.

Palavras-chave: Fertilizantes; Dinâmica no solo; Função dos nutrientes; Manejo nutricional.



Sumário

Nitrogênio (N)	4
Fósforo (P)	6
Potássio (K)	8
Magnésio (Mg)	10
Cálcio (Ca)	12
Enxofre (S)	14
Cobre (Cu)	16
Zinco (Zn)	18
Ferro (Fe)	20
Boro (B)	22
Níquel (Ni)	24
Manganês (Mn)	26
Cobalto (Co)	28
Molibdênio (Mo)	30
Cloro (Cl)	32
Iodo (I) e Selênio (Se)	34
Referências	36

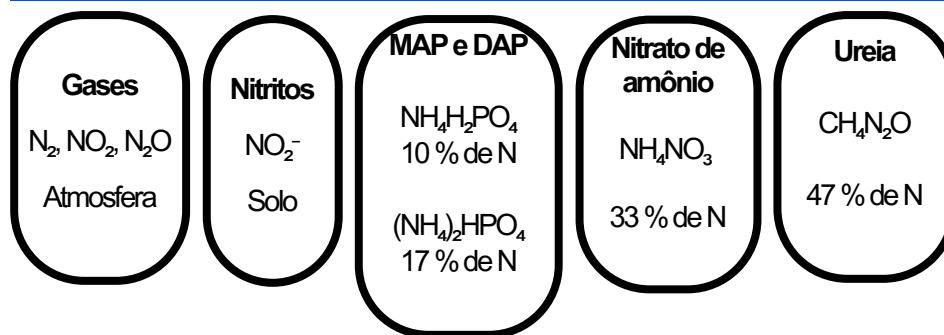
Nitrogênio (N)



GEFEN
Lucas Coan Perez

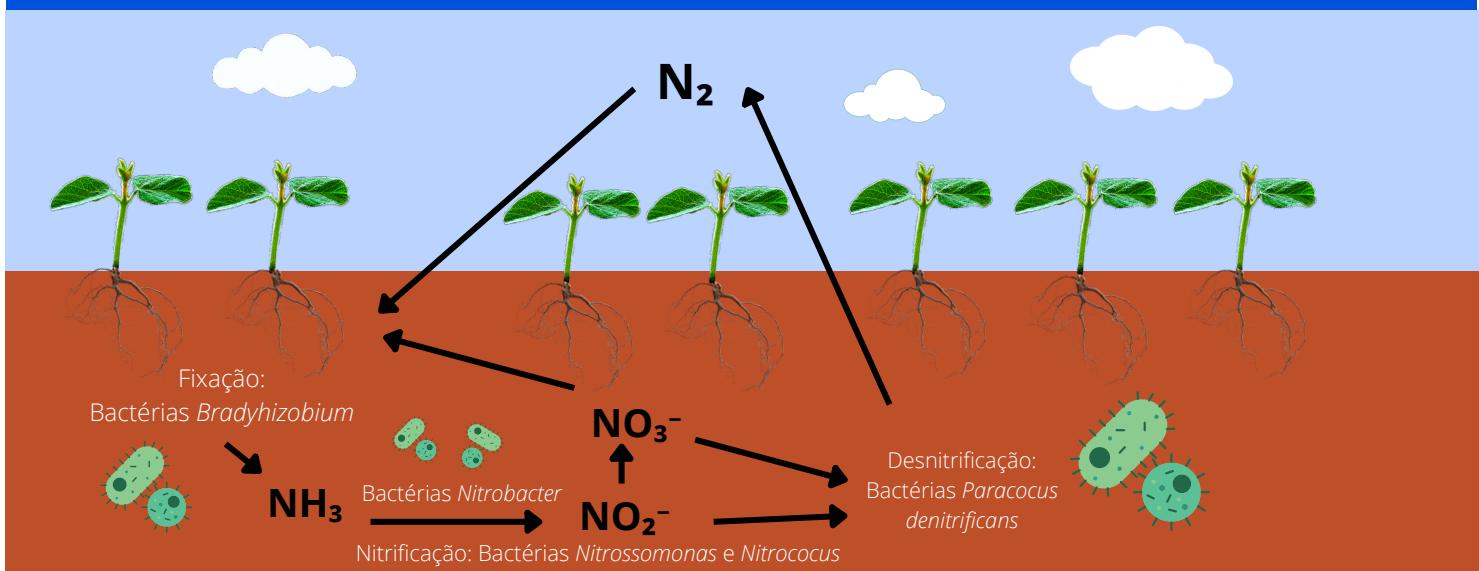
Cerca de 78% da atmosfera terrestre é composta por nitrogênio na forma de gás N_2 . Além disso, também pode-se encontrar o elemento na natureza em menor proporção na forma inorgânica em rochas sedimentares e no solo; e também orgânica nos oceanos e solos. Nas plantas e demais organismos vivos, o nitrogênio é um componente essencial para a formação dos ácidos nucleicos e proteínas.

Principais fontes



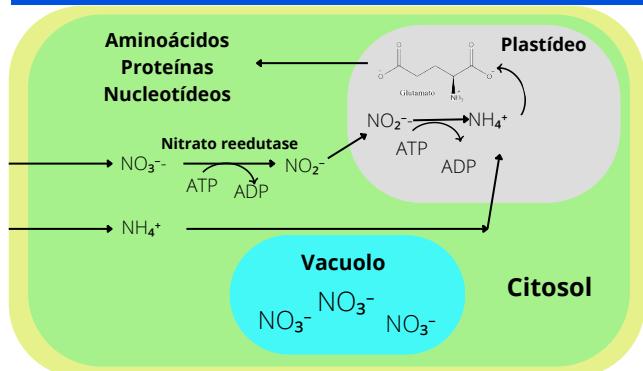
As fontes de nitrogênio empregadas na agricultura brasileira são importadas da Rússia (23 %), China (16 %), Argélia (12 %), Catar (8 %), Nigéria (6 %) e Emirados Árabes Unidos (5 %). Sendo que todos estes exportam ureia; A Rússia é líder em nitrato de amônio e China e Bélgica em sulfato de Amônio. Fonte: Produção Nacional de Fertilizantes, Governo do Brasil, 2020.

No solo



O nitrogênio no solo provém da aplicação de fertilizantes nitrogenados industriais, ou então da fixação biológica de nitrogênio atmosférico (N_2) feita por bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, associadas simbioticamente, às raízes de plantas leguminosas. Após sua fixação, este nitrogênio sofrerá transformações, como a nitrificação, e desnitrificação, pela ação microbiana no solo. As plantas absorvem o nitrogênio principalmente nas formas de nitrito (NO_3^-) e amônio (NH_4^+), sendo a primeira preferencial, mas também podem absorver aminoácidos e ureia (formas orgânicas).

Incorporação e metabolismo

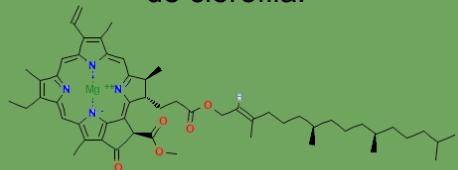


No citosol, o nitrato sofre redução assimilatória pela ação da enzima nitrato redutase, que gerará nitrito. O nitrito é transferido para dentro dos cloroplastos sendo reduzido a amônio. O íon amônio reage com o alfacetoglutarato proveniente do ciclo de Krebs, produzindo os aminoácidos glutamato e glutamina. Este processo de assimilação de nitrato é energeticamente mais custoso para planta em relação a assimilação do amônio, porém ocorre em maior proporção devido ao maior potencial de toxicidade deste último.

Principais funções

O nitrogênio é um dos nutrientes exigidos em maior quantidade pelas plantas, constituindo de 2 a 5 % de sua matéria seca.

O nitrogênio atua diretamente na fotossíntese, sendo um elemento estrutural da molécula de clorofila.



Fonte: National Center for Biotechnology Information

O nitrogênio é o principal componente dos aminoácidos, que compõem as proteínas. Em plantas deficientes neste nutriente a concentração de proteínas é reduzida e há diminuição do porte das plantas.

O nutriente também possui função estrutural nas bases nitrogenadas, que compõem o DNA e RNA.



Fonte: National Center for Biotechnology Information

O glutamato e glutamina são as primeiras moléculas orgânicas formadas nas folhas. Essas moléculas sofrem transformações formando os demais aminoácidos, que formarão as proteínas e demais compostos orgânicos nitrogenados.

Após a absorção, o nitrogênio é transportado via xilema nas mesmas formas em que foi absorvido (NO_3^- e NH_4^+) ou em formas orgânicas provenientes da fase de assimilação, como alantoína ($\text{C}_4\text{H}_6\text{N}_4\text{O}_3$) e ácido alantóico ($\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_4\text{O}_4$).



O nitrogênio tem alta mobilidade quanto à redistribuição no floema na forma de aminoácidos, dessa forma, sintomas de deficiência ocorrem em folhas velhas.

Na simbiose, as bactérias *Bradyrhizobium* sp. fornecem a enzima nitrogenase. A planta hospedeira fornece leghemoglobina, homocitrato e fontes de carbono.



A nitrogenase usa um cofator de Fe e Mo, FeMoco, que também possui aminoácidos em sua estrutura, e portanto, Nitrogênio.

O nitrogênio participa da produção de energia nas células através da composição das moléculas de ATP.

NH_4^+ é absorvido de forma passiva e uniporte.

NO_3^- é absorvido de forma ativa e simporte, com transporte simultâneo de H^+ .

Fósforo (P)



O fósforo é um macronutriente diretamente relacionado ao desenvolvimento, crescimento e reprodução das plantas. Está envolvido na formação de ATP, ADP, fotossíntese e reações de esterificação. Além disso, em níveis adequados ele aumenta a eficiência de uso da água e de outros nutrientes incrementando a produtividade.

Principais fontes

SUPERFOSFATO SIMPLES

16 % de P_2O_5 solúvel em água
16 % de Ca
10 % de S

SUPERFOSFATO TRIPLO

45 % de P_2O_5 solúvel em água
15% de Ca

MONOAMÔNIO (MAP) (fosfato monoamônico)

48 % de P_2O_5
10 % de N

DIAMÔMIO (DAP)

45 % de P_2O_5
17 % de N

FOSFATOS NATURAIS

5 % de P_2O_5 total
15 % do teor total de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico

No solo



O P apresenta baixa mobilidade no solo, devido a sua afinidade com os minerais da fração argila. Sua dinâmica é bastante dependente do pH do solo. Para aumentar sua disponibilidade, pode-se utilizar fertilizantes fosfatados, adoção do SPD (Sistema de Plantio Direto) como também a associação simbótica entre as raízes das plantas superiores e fungos micorrízicos.

Faixa de concentração no solo

- Teor total varia entre 200 e 3.000 mg/kg.
- O nível crítico de P disponível para a maioria das culturas se encontra a partir de 15-20 mg/kg.
- A discrepância entre a concentração total e aquela disponível para absorção está relacionada com as interações do elemento com o solo.

Faixa de concentração nas plantas

- Leguminosas:** 2,6 a 5,0 g/kg
- Cereais:** 2,0 a 3 g/kg .
- Café:** 1,6 a 1,9 g/kg .
- Citros:** 1,2 a 1,6 g/kg .
- Cana-de-açúcar:** 1,8 a 2,4 g/kg .

Incorporação e metabolismo

O Fósforo é um elemento essencial para inúmeras atividades da planta, como o crescimento, desenvolvimento e formação do ATP. A absorção radicular se dá em sua forma ionizada ($H_2PO_4^-$ ou HPO_4^{2-}). Após a absorção pelas raízes, o P será transportado para a parte superior da planta, o qual será assimilado nas moléculas orgânicas.

Principais funções

Energia

O P é responsável pelo **armazenamento e transferência** de energia como, a glicose, frutose e ATP.

ADP e ATP

O nutriente possui função **estrutural** no grupo fosfato que compõem o ADP e o ATP.



Fonte: Revista Agro@mbiente

Simbiose:

FUNGOS MICORRÍZICOS

Durante o processo, forma-se as hifas micorrízicas que aumentam a superfície de contato entre a raiz e o solo, elevando a chance de **absorção** dos nutrientes e da água. Essa extensão das raízes melhora a **resistência** à estresses bióticos e abióticos. Ela também incrementa a ciclagem de nutrientes.

DEFICIÊNCIA DE FÓSFORO

Menor perfilhamento em gramíneas;

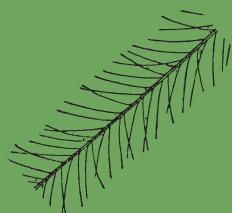
Redução do número de frutos e sementes;

Redução no brilho, tom verde-azulado ou manchas pardas; Ângulos foliares mais agudos;

Gemas laterais dormentes; Atraso no florescimento.

Reduz a produtividade, qualidade, valor e rentabilidade da cultura!

Várias espécies de plantas de diferentes famílias desenvolvem estruturas radiculares, proteoides que proporcionam alta eficácia na absorção de fósforo do solo



Sintomas:

EXCESSO DE FÓSFORO

Maturação acelerada; Interfere na absorção ou transporte de outros nutrientes.

Ex: No transporte para a parte aérea do Cu, Fe, Mg e Zn.

Potássio (K)

Cerca de 2,4 % da crosta terrestre é composta por K, sendo o sétimo elemento mais abundante, com inúmeras jazidas no mundo. A principal forma de K nos solos é a estrutural. Único cátion que não possui função estrutural na planta e, portanto, é uma exceção a um dos critérios de essencialidade. Em algumas culturas é o nutriente mais abundante nos tecidos foliares, superando os teores de N.

Principais fontes

Cloreto de potássio

KCl

60 % de K₂O

Sulfato de potássio

K₂SO₄

48 % de K₂O

Langbeinita

K₂SO₄ · 2(MgSO₄)

22 % de K₂O

Nitrato de potássio

KNO₃

44 % de K₂O

No solo

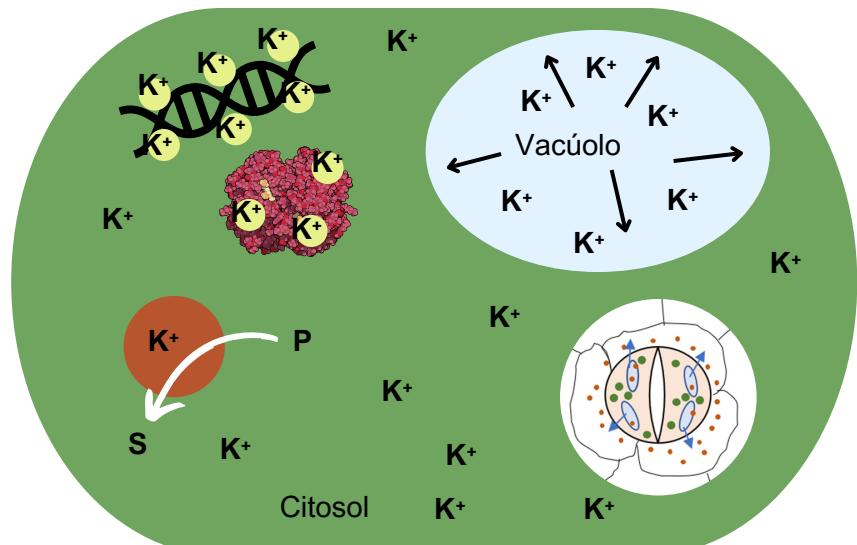
O K presente na solução do solo está em equilíbrio com o K retido nas cargas das coloides (K trocável), a qual supri rapidamente a redução do K em solução por absorção das plantas ou perdas no sistema. Porém, a principal reserva de K no solo são os minerais, os quais constituem aproximadamente 98 % do K no solo, sendo parte de K estrutural, o qual não é disponível para as plantas e o K não-trocável, que é lentamente disponível. Apenas 2 % do K presente no solo é considerado disponível as plantas, ou seja, K trocável e K em solução. A baixa concentração deste nutriente e sua facilidade de movimentação no solo são fatores que contribuem para que o principal mecanismo de contato íon-raiz seja a difusão.

Incorporação e metabolismo

Até o momento, o K não tem nenhuma função estrutural conhecida nas plantas. Porém, este nutriente é fundamental no controle osmótico, transporte de sacarose no floema, síntese de proteína, controle do pH citosólico, ativação enzimática e assimilação de CO₂. É um elemento altamente móvel, presente na planta na forma de K⁺, a qual também é absorvida e transportada nos feixes vasculares; além de ser a mesma forma estocada no vacúolo.

A absorção de K é regulada por mecanismos de alta e baixa afinidade. Maiores teores de K no solo favorecem absorção com menor gasto de energia, utilizando canais iônicos.

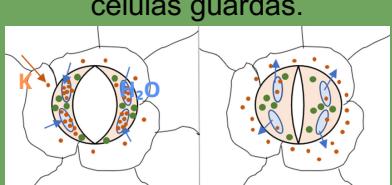
Curiosidade: Alguns cuidados são importantes durante amostragem de folhas para determinação de nutrientes, principalmente o K. A lavagem excessiva, ou até mesmo a coleta após fortes chuvas podem reduzir os teores nas folhas, levando a interpretações equivocadas.



Fonte: adaptado de Maathus (2009)

Principais funções

Plantas com adequado teor de K apresentam maior regulação osmótica, eficiência de uso da água e consequentemente menor danos causados por seca. Tais condições decorrem do melhor modulação dos estômatos.



Plantas com baixos níveis de K são mais suscetíveis a incidência de doenças.

Uma hipótese para essa condição está na maior estruturação da parede celular na presença de K, resultando em maior dificuldade para infecção do patógeno.

Exportação pelo floema de sacarose produzida na folha é reduzida. Tal condição compromete o desenvolvimento radicular.



Ocorre clorose nas margens das folhas velhas, com evolução para necrose.

A planta perde a turgidez e torna-se mais suscetível a estresse bióticos.



A presença de K no tonoplasto e membrana plasmática causam alteração no turgor das células guardas.

Teor ideal:
20 - 55 g kg⁻¹

Muito variável
em função da
espécie.



Apresenta mobilidade no xilema e floema.

O nutriente se movimento no solo pelo processo de difusão.

Não foram relatados pois as plantas de modo geral podem absorver quantidades de K muito superiores as suas necessidades.

A fonte mais comum para suprir a demanda de K é o KCl, e algumas culturas são suscetíveis aos efeitos salinos ou concentração de Cl; como tabaco, batata doce, abacaxi.



Magnésio (Mg)

Sendo o sétimo elemento mais abundante na crosta terrestre, o magnésio se destaca pela diversidade de seus fins industriais e por seus papéis no metabolismo de animais e plantas. Na fisiologia vegetal, é mais conhecido por ser o elemento central da molécula de clorofila, além das suas funções de ativador enzimático e estabilizador estrutural de proteínas.

Principais fontes

Dolomita



Abundante no cerrado brasileiro

Magnesita



Jazidas expressivas na Bahia e Ceará

Kieserita



Os maiores exportadores são a Alemanha (78,3 %) e China (16,1 %)

Rochas processadas

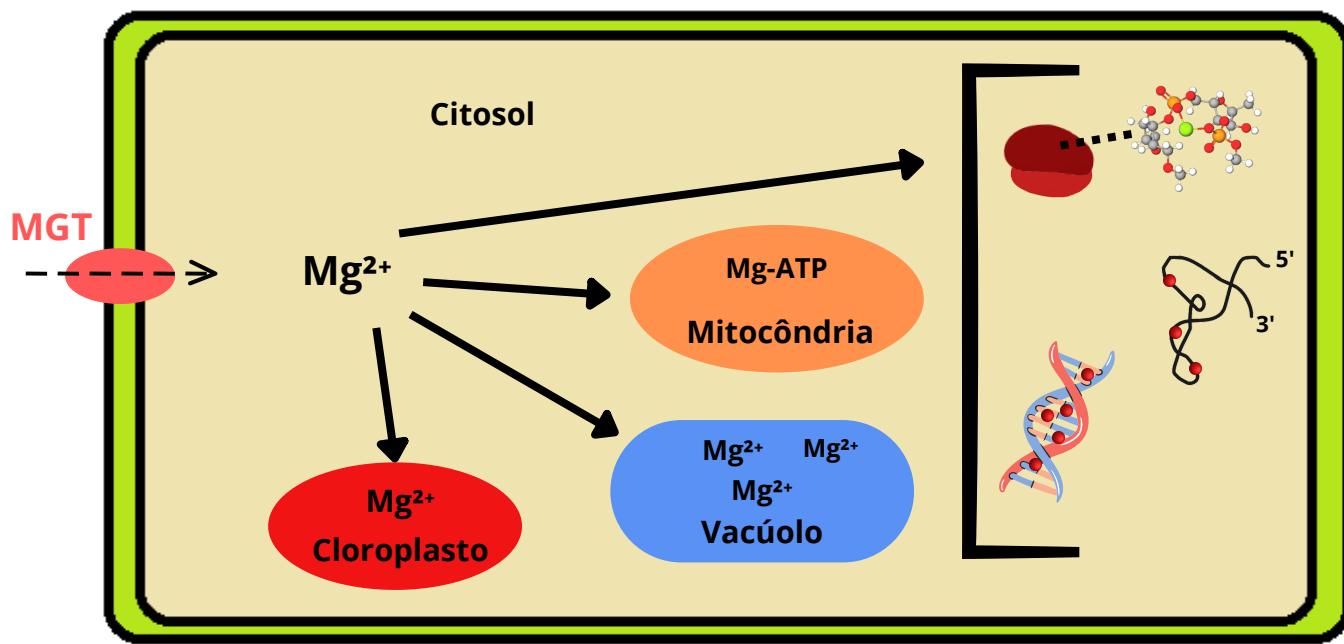
Termofosfatos magnesianos

Silicatos ou escórias de alto forno

No solo

O magnésio não é encontrado na natureza em sua forma elementar, mas sim associado a algum composto. As plantas, por sua vez, absorvem apenas a forma iônica Mg^{2+} presente em solução. Assim como outros nutrientes de natureza metálica (tais como potássio e cálcio), as principais perdas de magnésio no solo decorrem principalmente dos processos de lixiviação e erosão, sendo desejável alta capacidade de troca catiônica (CTC) nos solos para aumentar a sua retenção. Dessa forma, a disponibilidade de magnésio acaba sendo afetada em solos de média a alta acidez, quando os valores de pH em água são próximos a 5,0.

Incorporação e metabolismo



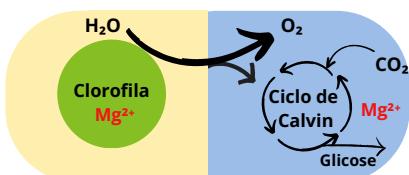
Fonte: Adaptado de De Bang et al. (2021)

O magnésio é transportado para o interior das células vegetais por meio de proteínas transportadoras de magnésio (MGT). Uma vez no espaço intracelular, o magnésio pode seguir diversas rotas. Nos cloroplastos, participa ativamente da fotossíntese ao compor a clorofila e a enzima RuBisCo, além de neutralizar o potencial negativo dos tilacóides. Pode ainda seguir para as mitocôndrias, e ser utilizado como íon metálico nas moléculas de ATP, ou ser direcionado para o vacúolo onde é armazenado. Outro papel do magnésio consiste na estabilização da configuração de proteínas, como as proteínas ribossomais, além de sequências de ácidos nucleicos, como os RNA's transportadores.

Principais funções

Fotossíntese

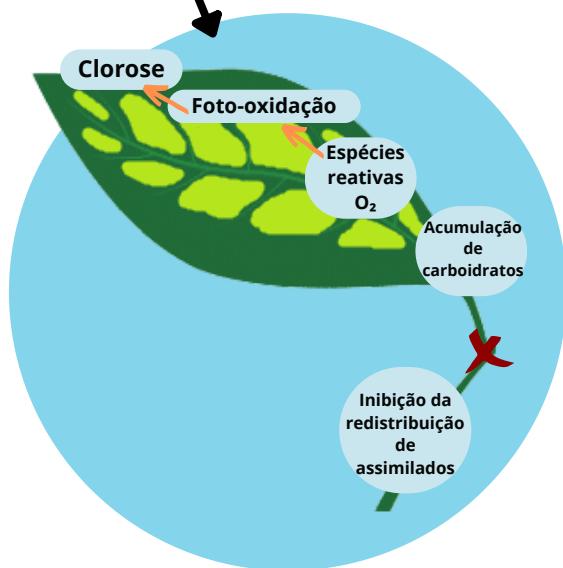
O magnésio é fundamental nas etapas fotoquímica e química da fotossíntese, principalmente pelo fato de constituir a clorofila e a RuBisCo, sendo esta última responsável pela fixação de carbono.



No geral, plantas saudáveis apresentam cerca de 0,15 a 0,50 % da sua matéria seca constituída por magnésio.

A deficiência de magnésio implica em células vegetais com processos fotossintéticos reduzidos ou comprometidos. Dessa forma, há formação de espécies de oxigênio reativo que causam foto-oxidação, e a consequente clorose das folhas.

Como consequência, todo o fluxo transpiratório é afetado, fazendo com que os carboidratos fiquem acumulados na folha, prejudicando o crescimento e metabolismo da planta.



Mobilidade

Apresenta alta mobilidade via floema e xilema. Sendo assim, os sintomas de deficiência ocorrem em folhas velhas, na região do baixo da planta.

A translocação de magnésio se dá pelo fluxo transpiratório.

Expressão de proteínas

É responsável por compor e dar estrutura à diversas proteínas e sequências de ácidos nucleicos. Sendo assim, sua deficiência pode comprometer a atividade e síntese de proteínas.

Crescimento de raízes

Existe uma relação antagônica de inibição competitiva entre magnésio e alumínio. Dessa forma, teores adequados de magnésio no solo evitam a absorção e o efeito tóxico do alumínio no crescimento de raízes. Além disso, plantas bem nutritas em magnésio promovem maior exsudação radicular de ácidos orgânicos que inativam o alumínio tóxico.

Carregador de fósforo

O magnésio age como carregador de fósforo nas plantas. Plantas com doses adequadas de magnésio apresentam maiores quantidades de fósforo absorvido.



Cálcio (Ca)

O cálcio é um macronutriente secundário que desempenha função estrutural, mensageiro secundário na sinalização celular e estabilização de membranas e citoesqueleto. Absorvido como Ca^{2+} , o contato íon-raiz ocorre principalmente via fluxo de massa, transportado via xilema e depositado nos pontos de crescimento como folhas e brotos.

Principais fontes

Sulfato de cálcio (gesso agrícola)

$\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
16 % Ca
13 % S

Calcário dolomítico

32 % CaO
12 % MgO

Calcário calcítico

97–99 % CaCO_3

Nitrato de cálcio

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
19 % Ca

Cloreto de cálcio

CaCl_2
24 % de Ca

No solo

Faixa de concentração no solo

Nos solos tropicais intemperizados a quantidade de cálcio está em torno de < 1,5 cmolc /dm³.

Em solos argilosos, ocupa cerca de 65% da CTC, está retido na forma Ca^{2+} nas argilas e na matéria orgânica do solo.

Faixa de concentração nas plantas

Leguminosas: 3 a 25 g/kg

Cereais: 2,5 a 10 g/kg

Café: 10 a 15 g/kg

Citros: 35 a 50 g/kg (Boletim 100)

O Ca pode ser fornecido às plantas por meio de minerais do próprio solo, materiais orgânicos, adubos, calcários e gesso. Como a maior parte dos solos brasileiros possui elevada acidez, a realização da calagem já acaba por suprir esse elemento de forma eficiente. A deficiência de Ca é mais comum em culturas como amendoim e hortaliças, dando destaque ao tomate, que acaba apresentando sintomas de deficiência nos frutos devido à baixa mobilidade desse elemento no floema.

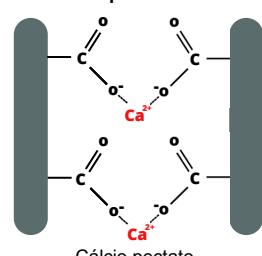
Incorporação e metabolismo

O Ca^{2+} é absorvido da solução do solo por proteínas de transporte localizadas nas membranas das células das raízes e transportado para a parte aérea via xilema, por fluxo respiratório, até os pontos de crescimento que requerem alta concentração do elemento.

Maior parte do cálcio no tecido vegetal está em formas insolúveis, presente na parede celular e na lamela média, ligados a pectatos.

A baixa concentração deste elemento no citosol é essencial para sua atuação como mensageiro secundário. O aumento transitório da concentração de Ca no citosol é provocado por estresse abióticos e bióticos. A variação da concentração provoca respostas fisiológicas capazes de modificar o funcionamento de proteínas gerando resposta específicas para diferentes tipos de estresses.

Os cátions divalentes podem formar ligações cruzadas entre as bordas paralelas que possuem grupos carboxila negativamente carregados. As ligações cruzadas do cálcio exercem um papel estrutural nas paredes celulares.



Cálcio pectato

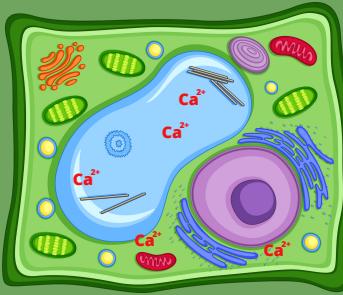
Principais funções

Sintomas de deficiência

Baixo desenvolvimento das raízes e aspectos gelatinoso nas pontas das folhas e nos pontos de crescimento, morte dos ponteiros e deformação de folhas.

A função do Ca^{2+} como mensageiro secundário na sinalização dos processos celulares é mediado por perturbações transitórias da concentração deste no citosol.

Fatores externos, como luz, temperatura, gravidade, toque e infecção por patógenos, em combinação com sinais hormonais internos, são percebidos através de diferentes receptores, levando a padrões espaço-temporais específicos de flutuação na concentração citosólica de Ca^{2+} que desencadeia uma cascata de processos.



Exemplos de deficiência de Ca

Podridão apical em tomate, pimentão e abobrinha que causam caroços necróticos, aparecem no final da flor dos frutos.

As bordas das folhas de repolho, alface e couve de Bruxelas apresentando deficiência de Ca são susceptíveis de desenvolver bordas necróticas, sintoma conhecido como *tip burn*.

Na maçã, a deficiência de Ca é chamada *bitter pit*, refletindo na casca da fruta que desenvolve caroços e manchas marrons na pele e/ou na carne, resultando em sabor amargo.



A função estrutural Cálcio é conferir rigidez e estabilidade na parede celular, através de ligações iônicas do cálcio com a rede de pectinas.

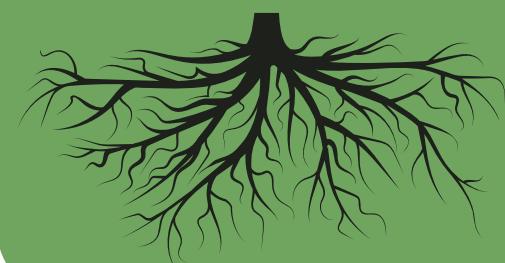
A proporção de pectato de Ca na parede celular tem grande importância para resistência a patógenos fúngicos e bacterianos e, assim, para o armazenamento e a qualidade pós-colheita de frutos.



Absorção de nutrientes

Mudanças na disponibilidade externa de nutrientes afetam a concentração de Ca^{2+} citosólico podendo ativar ou reprimir transportadores de nutrientes dependentes de Ca^{2+} , como por exemplo transportadores/canais para K^+ , NO_3^- , Fe^{2+} e NH_4^+ .

A falta de fósforo também pode afetar negativamente as oscilações na concentração citosólica de Ca^{2+} causada por estresse mecânico, salino, osmótico e oxidativo. Estas oscilações desempenham um papel fundamental no crescimento de pelos radiculares e associações simbióticas.



Como o Ca no floema é mantido em concentrações muito baixas, a parte aérea depende da transpiração ou pressão da raiz para fornecer Ca através do xilemas aos órgãos em desenvolvimento.

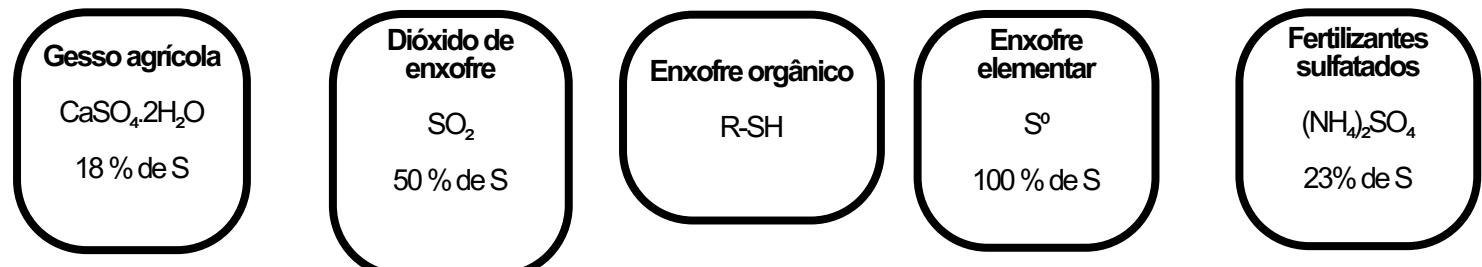
Para órgãos com baixa transpiração, como frutas e folhas de coração interno em vegetais, a quantidade de Ca pode ser insuficiente levando a uma gama de sintomas de deficiência. Esses sintomas refletem o papel do Ca na formação adequada das paredes celulares.

Os sintomas foliares típicos da deficiência de Ca são lesões, má formação das folhas e posteriormente necrose.

Enxofre (S)

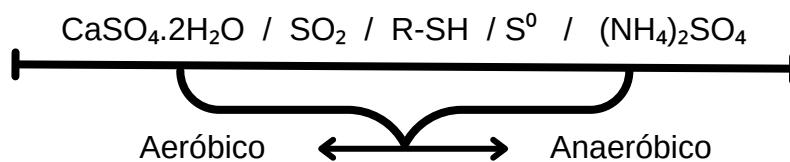
Cerca de 0,11 % da crosta terrestre é constituída de S, sendo a rocha-mãe compondo a fonte primária. Outras fontes adicionais são o SO_2 da atmosfera, depositado graças às chuvas, além das fontes orgânicas que constituem 95 % do enxofre no solo. Este elemento compõem principalmente as proteínas nas plantas.

Principais fontes



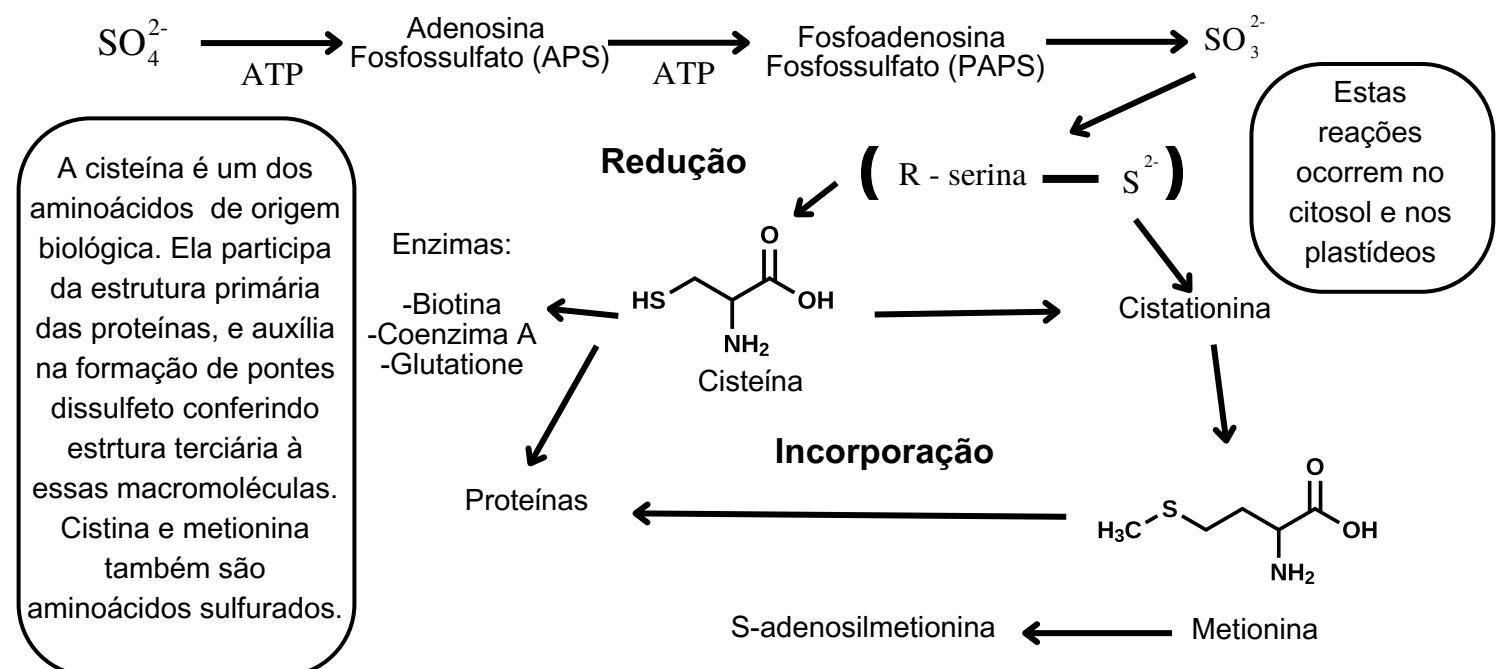
Devido a constante necessidade de condicionar o solo brasileiro, utiliza-se em larga escala o gesso agrícola como fonte de enxofre no solo. Porém, importa-se também enxofre elementar e formas brutas de enxofre para produção de fertilizantes, sendo os EUA, Canadá e China os maiores produtores e exportadores.

No solo



Independente da origem do enxofre, no solo ele sofrerá processos de oxidação ou redução por bactérias. Em solos bem drenados, aeróbicos, ocorrerá a mineralização e formação do sulfato (SO_4^{2-}), absorvível pelas plantas, porém em áreas alagadas, ambiente anaeróbico, formará o gás sulfídrico (H_2S), tóxico às plantas, sendo perdido para a atmosfera.

Incorporação e metabolismo



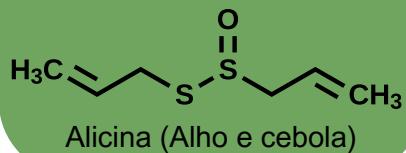
Principais funções

Na maioria das plantas a concentração ideal de enxofre varia de 0,1 a 0,5 % da massa seca vegetal.

Após incorporado no tecido vegetal, o enxofre é pouco móvel, dessa forma, sintomas de deficiência ocorrem em folhas novas. Amarelecimento é a principal característica.

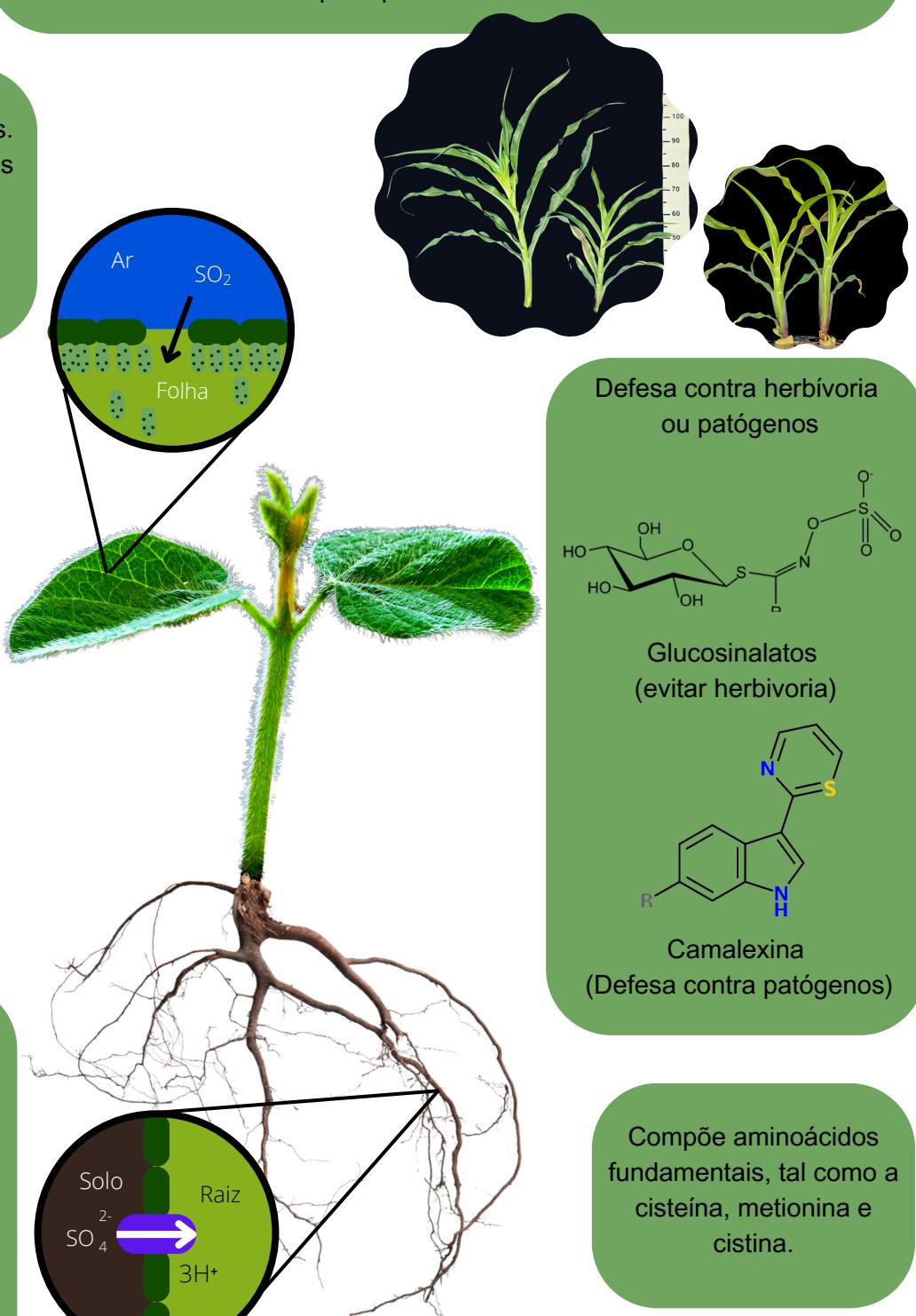
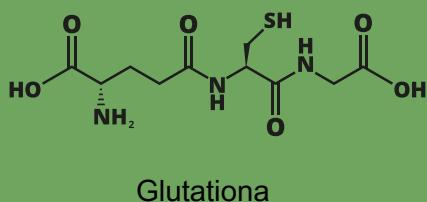
Fitoquelatinas
Desintoxicação de metais pesados. As fitoquelatinas aprisionam metais tóxicos como Pb ou Cd e posteriormente armazenados no vacúolo, evitando reações com proteínas do citosol.

Cheiro e sabor de alimentos



A glutationa é a forma em que o enxofre é distribuído pela planta após assimilado. Essa molécula percorre o floema até os órgãos drenantes, além de regular a absorção de enxofre nas raízes.

Além de transporte, a glutationa atua como molécula de defesa contra processos oxidativos em resposta à estresses abiótico.



O enxofre está intimamente ligado à fixação de N do ar, inclusive a relação S/N pode ser utilizada como meio de avaliar a qualidade nutricional da planta.

Absorvido via transportador simporte ($3\text{H}^+/\text{SO}_4^{2-}$)

Radicais sulfidrilos (-SH) e dissulfetos (-S-S) desempenham papel na resistência a estresses abióticos em plantas, tais como seca e frio, principalmente em culturas de inverno.

Cobre (Cu)

O cobre é um micronutriente que participa da estrutura de diversas enzimas. Por ser um ácido de Lewis ele atua nos sítios ativos catalíticos. Além disso, a facilidade de mudança de estado de oxidação entre as formas Cu(I) e Cu(II) o torna um agente chave em processos redox. A forma química absorvida pelas plantas é divalente Cu^{2+} . Vale ressaltar que esse micronutriente possui grande afinidade por peptídeos e grupos sulfidril, além de grupos fenólicos e carboxílicos.

Principais fontes

Carbonato de cobre CuCO_3 48 % de Cu	Óxido cuproso Cu_2O 80 % de Cu	Óxido cúprico CuO 70 % de Cu	Nitrato de cobre $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 22 % de Cu, 9 % de N	Fosfato cúprico amoniacial CuNH_4PO_4 32% de Cu, 34% de P_2O_5 , 5% de N	Sulfato de cobre CuSO_4 24% de Cu, 11% de S
--	---	--	---	---	---

No solo

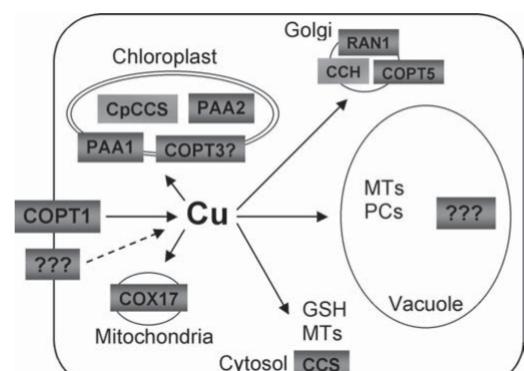
- O cobre deve ser mantido e controlado em concentrações adequadas para cada cultura em específico. Haja vista que o mesmo pode se configurar como um elemento tóxico e acarretar em fitotoxicidade para as plantas, dependendo das doses utilizadas.
 - A quantidade média de cobre nas plantas fica em torno de 10 mg/kg no peso seco
 - Diversas proteínas que possuem Cu são responsáveis por variadas funções, como a fotossíntese, respiração, desintoxicação de radicais superóxido e lignificação.
 - Solos argilosos, tendem a ter maior concentração de cobre, devido à retenção pela argila.
 - A matéria orgânica contribui para a mobilização do cobre no solo. A matéria orgânica forma complexos láveis com o cobre contribuindo para sua retenção no solo.

Tabela. Teor de cobre adequado para algumas culturas (adaptado de Malavolta et al., 1989).

Cultura	Concentração de Cu (mg/kg)
Algodão	30 - 40
Café	50 - 60
Cana-de-açúcar	08 - 10
Citros	05 - 16
Milho	06 - 20
Soja	10 - 30

Incorporação e metabolismo

O Cobre é movimentado no solo para posteriormente ser incorporado e absorvido pelas raízes, majoritariamente através de fluxo de massa. O Cu se acumula dentro da célula vegetal, o qual é absorvido na forma de Cu^{2+} e Cu-quelato, por meio de canais e transportadores no processo ativo, sendo posteriormente transportado para as demais subcélulas e compartimentos. Além do mais, vale destacar que ele possui antagonismo com o Zn^{2+} no nível de absorção, já que um inibe o trabalho de absorção do outro

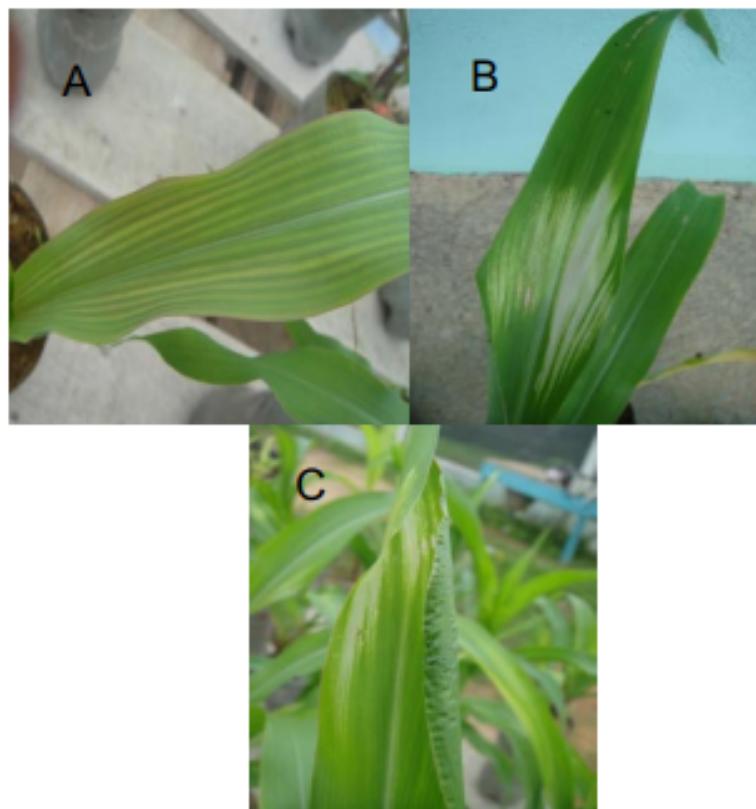


Fonte: inmaculada Yruela (2005)

Principais funções

A deficiência de cobre nas plantas pode ser proveniente da mudança na expressão de uma série de genes presentes nas folhas e raízes. Desse modo, sintomas típicos de deficiência de cobre aparecem nas pontas de folhas jovem e depois se estendem até as folhas marginais. Essas folhas podem apresentar falhas na formação, clorose, ou até mesmo necrose, comprometendo, assim, o desenvolvimento das plantas.

Além do mais, o atraso no florescimento e na senescência são características típicas que a falta de cobre pode garantir nas plantas.



Deficiência de cobre. A - 16 dias após emergência (DAE); B - 34 DAE: terço médio da lamina foliar; e C - 33 DAE.

Fonte: Revista Agro@mbiente

Essencial para inúmeros processos fisiológicos, atuando como co-fator para muitas metaloproteínas. Uma das principais funções é com relação à fotossíntese, uma vez que a clorofila depende do Cu para ser sintetizada. Ademais, esse micronutriente se responsabiliza pela produção de hormônios vegetais de crescimento, e síntese de proteínas e carboidratos no metabolismo vegetal.

As enzimas superóxido dismutases são capazes de realizar a desintoxicação de radicais superóxido. Assim sendo, a Cu-Zn-SOD está localizada no estroma dos cloroplastos, onde o átomo de Cu está diretamente envolvido na desintoxicação de O_2^- gerado durante a fotossíntese. A atividade da enzima é muito mais baixa em condição de deficiência de Cu.

Mesmo após as plantas absorverem o cobre, as mesmas deverão solubilizar e reduzir o Cu com o intuito de utilizá-lo para as atividades fisiológicas.

A associação do micronutriente Cu com fungicidas tem se tornado uma alternativa muito eficaz para controle contra doenças. Desse modo, esse mecanismo garante maior imunidade e resistência para a planta, uma vez que esse micronutriente induz a planta a produzir compostos que dificultam o desenvolvimento de pragas e patógenos. Dentre eles, é possível citar a lignina, que cria uma parede celular espessa, promovendo uma barreira física e produz substâncias antimicrobianas contra pragas e patógenos. Tudo isso acarreta em um menor impacto ambiental, já que o Cobre é uma fonte mais segura e menos agressiva.



Zinco (Zn)

O zinco é um micronutriente que atua como cofator enzimático e é necessário para ativação, regulação e estabilização de estruturas proteicas. O zinco é absorvido principalmente como Zn^{2+} após entrar em contato com as células radiculares via fluxo de massa, em sua maioria, e em menor taxa por interceptação radicular.

Principais fontes

Sulfato de zinco hepta hidratado

$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$

mínimo: 20 % de Zn

Óxido de zinco

ZnO

mínimo: 72 % de Zn

Quelato de zinco

Zn solúvel + agente quelante
% de Zn depende do ligante

Cloreto de zinco

$ZnCl_2$

mínimo: 24 % de Zn

Sulfato de zinco anidro

$ZnSO_4$

mínimo: 35 % de Zn

Nitrato de zinco

$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$

mínimo: 18 % de Zn

No solo

O zinco tem distribuição uniforme em rochas magmáticas (80 mg/kg a 120 mg/kg), com maiores teores em sedimentos argilosos e menores em arenitos. A ocorrência do zinco, em rochas, se dá principalmente na forma de sulfetos (ZnS). O zinco é fortemente adsorvido em solos argilosos e em menor taxa em arenitos.

A solubilidade do zinco é afetada pelo pH, dessa forma, calagens que elevem o pH acima de 6,0 podem induzir a deficiência deste micronutriente. Além disso, adubações elevadas com fosfatos também podem induzir a deficiência de zinco pela redução de sua solubilidade.

A deficiência de zinco é comum em solos alcalinos, de baixa fertilidade natural e que receberam altas doses de calcário. Os sintomas são: clorose internerval em folhas novas, diminuição e estreitamento do limbo foliar, e ramos com internódios curtos. A ocorrência é mais frequente em amendoim, café, citros, arroz e milho.

Interpretação dos teores de zinco em solos tropicais e subtropicais (extrator DTPA-TEA)

Classe	Culturas perenes (mg/dm ³)	Culturas anuais (mg/dm ³)
Baixo	<5,0	<0,6
Médio	5,0 - 10,0	0,6 - 1,2
Alto	> 10,0	> 1,2

Concentrações aproximadas de micronutrientes em folhas maduras de várias espécies (excluindo plantas muito sensíveis ou altamente tolerantes)

Classe	Zinco (mg/kg)
Deficiente	10-20
Normal	27-150
Excessivo	150-400

Fonte: adaptado de Boletim 100.

Incorporação e metabolismo

O zinco é absorvido pelas raízes e folhas, principalmente na forma divalente (Zn^{2+}). Pelas raízes, ocorrem três estratégias de movimento no solo e solubilização do nutriente: a) movimento do Zn^{2+} presente na solução do solo o via fluxo de massa; b) exudação de ácidos orgânicos que solubilizam compostos contendo zinco e liberam o Zn^{2+} ; e c) liberação de fitossideróforos que complexam o Zn, formam Zn-quelato.

O Zn absorvido é transportado para parte aérea via xilema. Todo este processo ocorre por transportadores de diferentes famílias, sendo os IRT1 induzidos por alto conteúdo de zinco, enquanto que os transportadores Z1P1, Z1P3, Z104 tem maior expressão em baixas concentrações de Zn.

Principais funções

O zinco participa de quatro tipos/sítios de ligações que induz a atividade biológica das enzimas: a) catalítica; b) estrutural; c) co-catalítica e d) interface com proteína

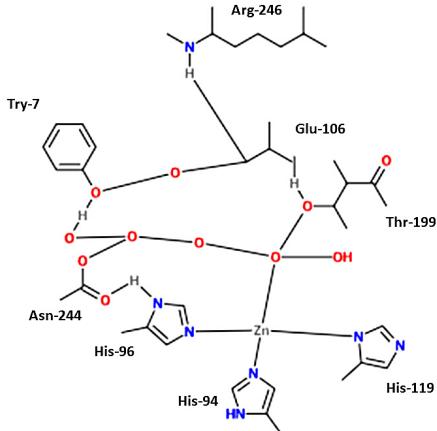
O zinco é componente estrutural da enzima superoxidase dismutase (CuZn-SOD), responsável pela resposta ao estresse oxidativo.

Sob deficiência de Zn ocorre redução do crescimento da planta e o aparecimento de clorose em folhas novas, assemelhando-se a queima por excesso de luminosidade. Além disso, as folhas ficam pequenas e retorcidas. A deficiência de Zn inibe a síntese de triptofano e degradação de auxinas.

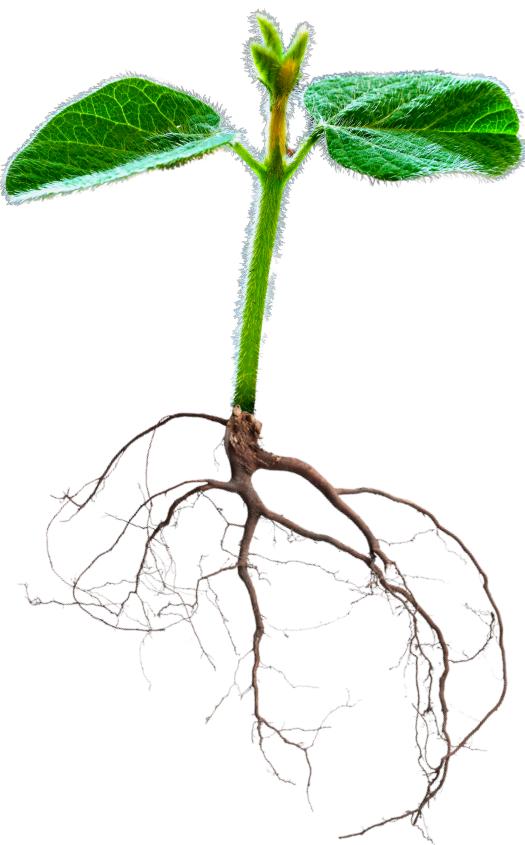
O zinco faz parte das enzimas: fosfatase alcalina; fosfolipase; carboxipeptidase; RNA polimerase; álcool dehidrogenase.

O zinco atua como componente estrutural dos ribossomos, o que explica a elevada necessidade de Zn em folhas em plena expansão e meristemas.

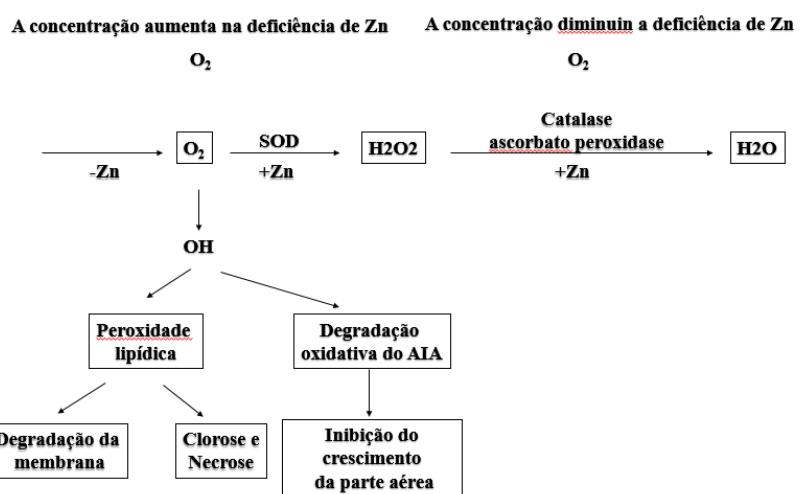
O zinco faz parte da enzima anidrase carbônica que está localizada no cloropasto e citoplasma. Em plantas C3 a anidrase carbônica auxilia na difusão de CO_2 para os locais de carboxilização pela rubisco. Enquanto que, em plantas C4, esta enzima media a hidratação do CO_2 formando HCO_3 que será utilizado pela enzima fosfofenolpiruvato carboxilase.



O Zn atua na manutenção da integridade da membrana celular através da proteção das proteínas contra o stress oxidativo.



O metabolismo do carbono é influenciado pelo Zn, pois este participa indiretamente nos fotossistemas e no ciclo de Calvin-Benson. Uma das enzimas sensíveis a deficiência de Zn é a frutose- 1,6 fosfatase, pois o Zn se liga em um sítio ativo ajudando a estabilizar sua estrutura, o que permite realizar sua função catalítica de forma eficiente.



Fonte: adaptado de Marschner (2011).

Ferro (Fe)

Cerca de 5 % da crosta terrestre é constituída por Fe, apresentando-se nas formas Fe^{2+} e Fe^{3+} . Apesar de ser um elemento abundante, muitos solos apresentam baixo teor de Fe na solução do solo e na forma trocável. A coloração avermelhada dos solos é, em geral, devido à presença de óxidos de Fe. É o micronutriente requerido em maior quantidade pelas plantas. Sua capacidade de ser convertido na forma reduzida (Fe^{2+}) e na oxidada (Fe^{3+}) permite que participe de diversas funções nas plantas.

Principais fontes

Sulfato Ferroso Heptahidratado

$FeSO_4 \cdot 7H_2O$

20,14 % de Fe

Óxido de Ferro (III)

Fe_2O_3

70 % de Fe

Fosfato Ferroso Amoniacal

$Fe(NH_4)PO_4 \cdot H_2O$

14,28 % de Fe

Quelatos de Ferro

Fe-EDDHA e Fe-EDTA

6 % e 13 % de Fe

No solo

Fe e a oxigenação do solo

Em respostas a alterações físico-químicas do meio, o Fe pode mudar de forma iônica. Nos solos, a principal ocorrência é em formato de óxidos. Solos aerados, geralmente, há pouca contribuição do Fe^{2+} . (Exceto quando há maior acidez do solo). Ciclos de oxidação e redução dão origem a áreas com óxidos de Fe diferentes, resultando em uma distribuição não homogênea de minerais férricos e alteração de cor do solo.

Fe e a matéria orgânica

Em solos com muita matéria orgânica, o Fe aparece complexado na forma de quelatos. Aminoácidos e ácidos fúlvicos podem complexar o Fe e promover seu movimento no solo.

Interação de Fe com outros elementos

Em solos ácidos há o aumento da disponibilidade de manganês, que inibe competitivamente a absorção de Fe pela planta.

Grandes quantidades de fósforo podem levar a precipitação do Fe disponível na solução do solo, uma vez que são formados fosfatos de ferro.

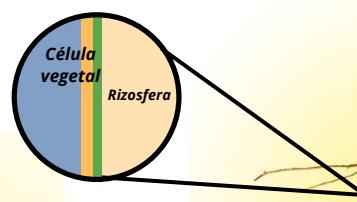
Fe e o pH do solo

Em solos alcalinos, é mais comum a ocorrência de deficiência de Fe. Fe é solúvel em níveis de pH mais baixos.

Incorporação e metabolismo

ESTRATÉGIA 1 (não gramíneas)

REDUÇÃO DE Fe^{3+} a Fe^{2+}



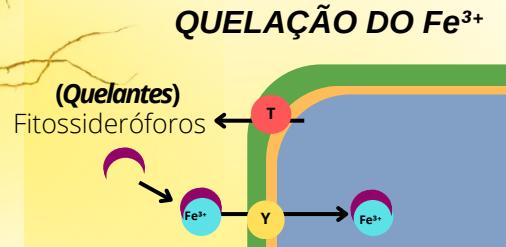
Fe^{3+} - quelato
(acidificação, tornando o Fe mais solúvel)

Fe^{2+}
compostos fenólicos, (Quelantes)
ácidos orgânicos e flavinas

Fe^{3+}
 Fe^{2+}
 Fe^{2+}
 Fe^{2+}
 Fe^{2+}

ESTRATÉGIA 2 (gramíneas)

QUELAÇÃO DO Fe^{3+}



LEGENDA

- T Transportador de fitossideróforos (FS)
- Y Transportador do complexo FS- Fe^{3+}
- FRO2 Enzima Fe^{3+} -quelato redutase
- T Transportador do Fe^{2+}

Principais funções

Biossíntese da clorofila

Faz parte das enzimas responsáveis pela síntese da molécula de clorofila.

Na deficiência de Fe a planta apresenta pigmentos amarelos, com a redução da concentração de clorofila na planta.

Faz parte da ferredoxina

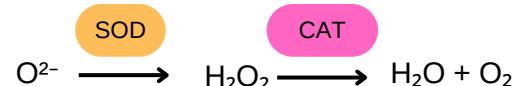
Ferredoxinas são proteínas que contém Fe e S que atuam como agentes de transporte de elétrons em reações biológicas de redução e oxidação. Atua na fotossíntese, na redução do nitrato (NO_3^-) e na fixação biológica de N.

O Fe é considerado **pouco móvel** quanto à redistribuição nas plantas, os sintomas característicos (clorose internerval) aparecem nas folhas novas.

Participa de enzimas envolvidas nos processos de oxidação e redução

Catalases (CAT), Peroxidase e Superoxido Dismutase (SOD)

Atuam no sistema de defesa da planta, mitigando o estresse oxidativo causado pelo excesso de espécies reativas de oxigênio (radicais livres).



Participa de outras enzimas:

Aconitase (atua no Ciclo de Krebs e no Ciclo do Glicoxalato).
Xantina oxidase, que podem gerar radicais livres em situações de excesso de Fe.

Quando presente na forma livre na célula e em grandes quantidades, o Fe pode gerar **espécies reativas de oxigênio**, catalisando reações que geram o ânion superóxido (O_2^-) ou peróxido de hidrogênio (H_2O_2).



Participa da fitoferritina

Um complexo proteico com aproximadamente 5 mil átomos de Fe, atuando como uma reserva desse nutriente.

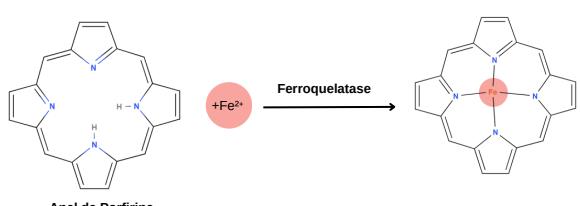
Participa da Ferroquelatase

A enzima atua na inserção do Fe no anel de porfirina.

Participa dos citocromos (proteínas heme)

Citocromos participam da cadeia transportadora de elétrons nos cloroplastos, mitocôndrias e enzimas.

O Fe participa do grupo prostético Fe-porfirina.



(Reação da ferroquelatase)

Em solos inundados ocorre a redução de Fe^{3+} , resultando no deslocamento de Fe^{2+} para a solução do solo.

Boro (B)

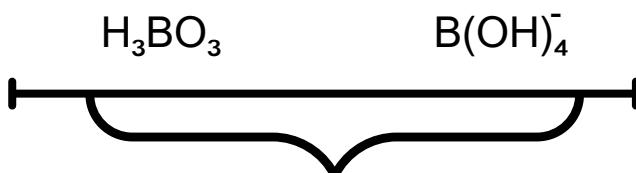


As principais funções do Boro estão relacionadas com a estrutura da parede celular e com substâncias pécticas associadas a elas, especialmente a lamela média. Os sintomas característicos de sua deficiência são a má formação de folhas jovens com evolução para necrose das folhas e gemas terminais, como também o superbrotamento de gemas laterais.

Principais fontes

Ácido Bórico H_3BO_3 17 % de B	Bórax $NaB_4O_7 \cdot nH_2O$ 10 % de B	Octaborato de sódio $Na_2B_8O_{13} \cdot 4H_2O$ 20 % de B	Ulexita $NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$ 8 % de B	Hidroboracita $CaO \cdot MgO \cdot 3B_2O_3 \cdot 6H_2O$ 7 % de B
---	---	--	--	---

No Solo

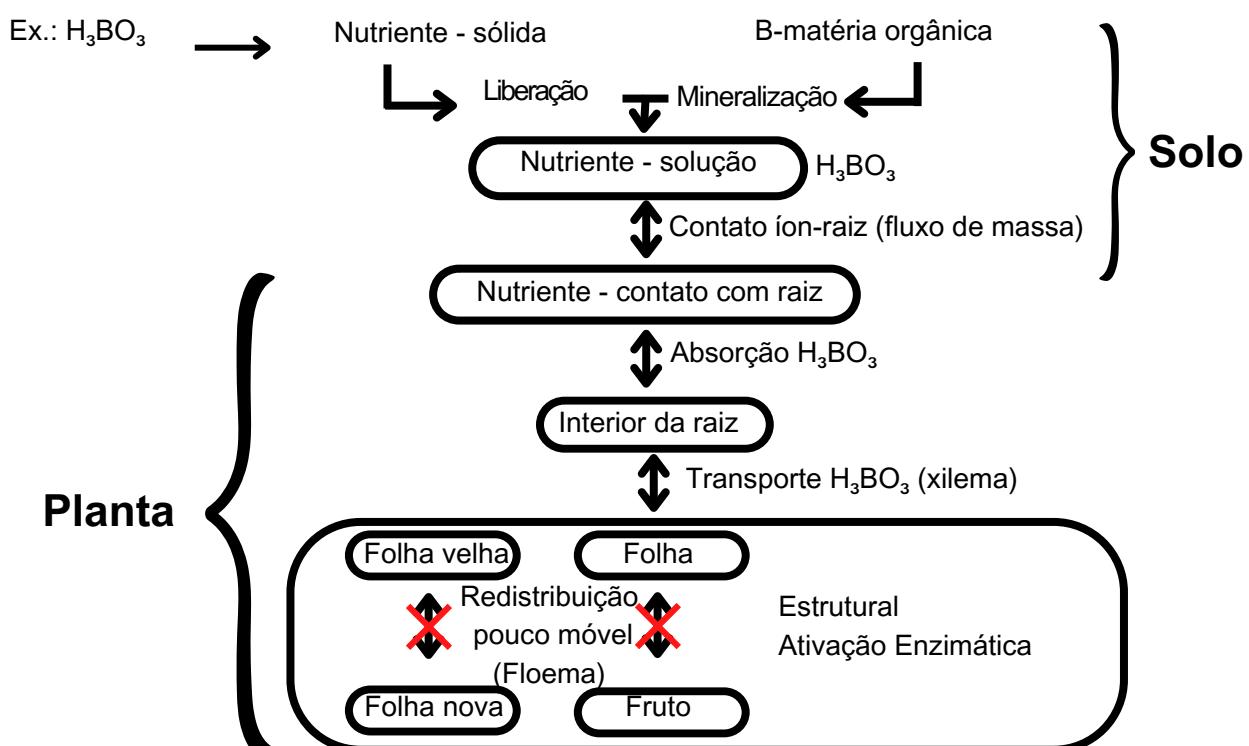


H_3BO_3 é a forma comumente absorvida

	mg/m ²	Perenes	Anuais
Baixo		<0,60	<0,20
Médio		0,60 - 1,00	0,20 - 0,60
Alto		>1,00	>0,60

Disponível principalmente como ácido bórico (H_3BO_3), esta forma neutra não-dissociada é muita sujeita à lixiviação. Dessa forma, além dos fatores ambientais, a fonte de boro adicionada, cuja solubilidade é varável, pode influenciar tanto na disponibilização quanto na perda do nutriente por lixiviação. Vale lembrar que solos com baixo teor de matéria orgânica e de textura arenosa podem apresentar deficiência de boro mais acentuada. Sua forma aniónica ($B(OH)_4^-$) é adsorvida pelos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, a depender do pH.

Incorporação e metabolismo



Principais funções

Átomos de boro são responsáveis pela ordenação e conformação de polímeros de pectina, auxiliando no crescimento vegetal e no desenvolvimento de novos tecidos.

Os polímeros de pectina são fundamentais para a formação da parede celular e para a aderência entre células (lamela média)

Mais de 90 % do boro está concentrado na parede celular das plantas.

Plantas que produzem látex requerem o nutriente em maior quantidade.

Contato íon-raiz via fluxo transpiratório sem gasto energético direto, acumulando-se nos meristemas para posterior desenvolvimento do tecido

Pouco móvel no floema, mas em algumas plantas o boro é retranslocado ligado a hexoses como o sorbitol e manitol.

Dependendo da espécie vegetal a concentração de B nas folhas pode variar de 5 a 100 mg/kg de massa seca



Deficiência: morte dos ponteiros; Abortamento floral; Deformação de folhas novas; Comprometimento da fixação biológica de nitrogênio.

Atenção às frutíferas e leguminosas, que requerem boro em taxas mais elevadas que gramíneas e outras dicotiledôneas. A análise de solo é a ferramenta fundamental para o bom manejo do boro no solo.

O Boro é, dos micronutrientes, o mais comumente encontrado em teores baixos nos solos brasileiros, principalmente aqueles de textura arenosa. Sua absorção pelas culturas não ultrapassa a ordem de 5 quilogramas por hectare.

Níquel (Ni)

O níquel foi o último elemento químico a entrar para lista de elementos essenciais, em 1987. É absorvido pelas plantas em sua forma bivalente (Ni^{2+}), e sua importância começou a ser observado em ao menos nove enzimas, como peptídeos e redutases, mas principalmente a urease, que apresenta dois átomos de Ni em sua composição. Essas enzimas atuam, principalmente, em mecanismos de defesa da planta e metabolismo de nitrogênio.

Principais fontes

Sulfato de níquel



19 % de Ni

Fosfato de níquel



4 % de Ni

Quelato de níquel

-
2 % de Ni

Carbonato de níquel



39 % de Ni

Nitrato de níquel



20 % de Ni

No solo

O pH é o fator que mais afeta os índices de solubilidade e disponibilidade desse nutriente no solo; à medida que o pH aumenta, a quantia de Ni disponível diminui.

Além de ser afetado pelo pH, a presença de outros cátions metálicos, como ferro, cobre, cobalto e zinco, podem inibir a absorção de níquel.

É considerado tóxico a partir de concentrações acima de 10 ppm nos tecidos de plantas sensíveis, e acima de 50 ppm para espécies mais acumuladoras.

Extrator Mehlich-3 tem apresentado bons resultados para determinar a disponibilidade de Ni no solo. a qual varia de 1 a 200 mg kg⁻¹.

Incorporação e metabolismo

O transporte de Ni ocorre pelo fluxo transpiratório do xilema. Sua absorção pode ocorrer por difusão passiva ou ativa, e a taxa de absorção varia, principalmente, pela sua absorção por transportadores de cátion que englobam zinco e cobre, estes elementos são inibidores de níquel por competição no transporte.

O transporte também é regulado por proteínas específicas ao níquel, além de moléculas complexantes, como a nicotianamina, histidina, ácidos cítricos e malato. Pode ser transportado como quelato pela proteína HoxN.

Cerca de 80 % do níquel nas raízes está no cilindro vascular, enquanto 20 % se encontra no córtex. Isso ocorre por haver uma grande retenção de Ni nos locais de troca catiônica nas células de parênquima do xilema.

Principais funções

O Ni é capaz de formar complexos estáveis com a cisteína e citrato, e ligar-se a enzimas. Suas funções fisiológicas presentam comportamento semelhante ao ferro e cobalto.

Quando encontrado acima de 50 mg kg⁻¹ nas plantas, é indicado nível de toxidez. Assim, pode haver diminuição de fotossíntese, além da remoção de íons Ca²⁺ do complexo produtor de oxigênio, e substituir o Mg na clorofila.

O Ni está presente na síntese de compostos químicos (como a fitoalexina), que agem como mecanismos de defesa contra patógenos.

A deficiência desse nutriente pode afetar a produção de lignina, prejudicando a resistência da parede celular e, consequentemente, a proteção contra doenças.

Em matéria seca:
0,1 a 5,0 mg kg⁻¹.

Níveis de toxidez: acima de 50 mg kg⁻¹ (salvo espécies acumuladoras).

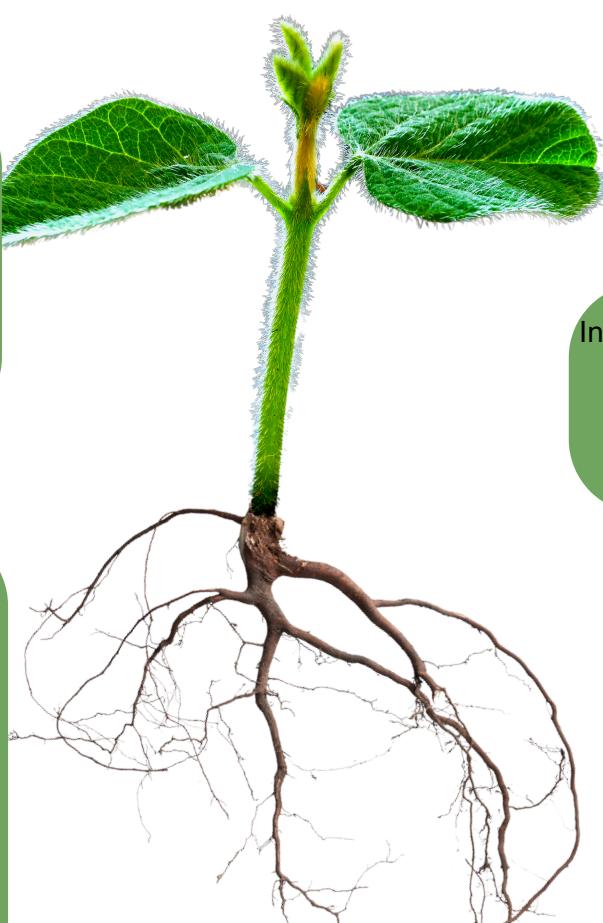
A necrose na ponta das folhas é um sintoma típico de deficiência, e ocorre por conta do acúmulo de ureia. Diminuição do crescimento vertical e tamanho reduzido das folhas são características de sintomas em espécies lenhosas.

Inicialmente, é translocado para a produção de sementes e possui média mobilidade na planta.

O nutriente se movimenta no solo pelo processo de difusão.

É um componente essencial para conversão da ureia em amônio, por ser cofator da enzima urease.

Ademais, se estiver em baixas quantidades, pode ocasionar toxidez da planta, pelo excesso de ureia acumulado no tecido.



Manganês (Mn)

O manganês é um metal de transição encontrado na natureza na forma mineral, como na pirolusita (MnO_2), rodocrosita ($MnCO_3$) e Manganita ($MnO(OH)$). Nas plantas, atua como um micronutriente, responsável pela ativação enzimática em diversas etapas do metabolismo vegetal, com ênfase na fotólise da água e catabolismo de espécies reativas de oxigênio.

Principais fontes

Sulfato de manganês

$MnSO_4 \cdot 3H_2O$

26 a 28 % de Mn

Oxissulfato de manganês

$MnO \cdot MnSO_4$

25 a 70 % de Mn

Cloreto de manganês

$MnCl_2 \cdot 4H_2O$

25 % de Mn

Carbonato de manganês

$MnCO_3$

40 % de Mn

Óxido de manganês

MnO

41 a 68 % de Mn

Nitrato de manganês

$Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$

16 % de Mn

No solo

Faixa de concentração no solo e disponibilidade

- Vária de 20 ppm a 3000 ppm ou 0,002 % a 0,30 %
- Em solos ácidos há maior disponibilidade devido a maior solubilidade dos compostos. Na Figura 1 observa-se a disponibilidade de Mn em função do pH

Incorporação e metabolismo

Absorvido ativamente pelo sistema radicular da planta como Mn^{2+} e transportado via xilema, é pouco redistribuído na planta, em consequência, os sintomas de carência se manifestam primeiro nas folhas mais novas. Após incorporado a planta, desempenha diversos papéis no metabolismo vegetal, com destaque ao funcionamento de enzimas, como a superóxido-dismutase (SOD) e catalase (CAT). Além disso, o elemento também participa da fotólise da água na reação de Hill, em conjunto com o cálcio.



Principais funções

O manganês influencia o pH do solo, afetando a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Ativação de enzimas envolvidas na síntese de hormônios vegetais, como auxinas e citocininas, que regulam o crescimento e o desenvolvimento da planta.

Ativação de enzimas envolvidas na biossíntese de compostos fenólicos, como taninos e ligninas, que ajudam na defesa da planta contra herbívoros e patógenos.

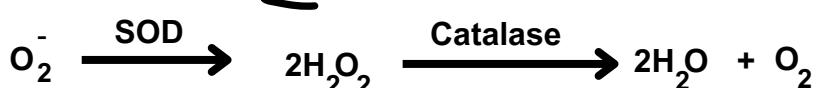
O manganês é um cofator de várias enzimas envolvidas em processos como fotossíntese, respiração, síntese de ácidos graxos e metabolismo de carboidratos.

O manganês é necessário para a síntese de clorofila, o pigmento verde responsável pela fotossíntese.

O manganês ajuda a fortalecer as paredes celulares das plantas, o que aumenta sua resistência a doenças e pragas.

$(\text{Mn}_4\text{CaO}_5)$ envolvido com o processo de fotossíntese.

(Fonte: Saito et al, 2020 – Content courtesy of Springer Nature)



Fonte: adaptado de Plant Medicine News

O Complexo de Evolução de Oxigênio é um agregado metálico composto por quatro átomos de manganês, um átomo de cálcio e cinco átomos de oxigênio e é considerado o único sistema natural capaz de catalisar a reação de oxidação da água, que é conhecida como fotólise da água ou ainda reação de Hill.

Cobalto (Co)

O Cobalto é um elemento benéfico às plantas, principalmente as leguminosas. Porém, quem de fato utiliza o cobalto são os microrganismos fixadores de nitrogênio presente nas raízes das plantas.

Principais fontes

Sulfato de cobalto



20 % de Co
10 % de S

Acetato de cobalto



18 % de Co

Carbonato de cobalto



42 % de Co

Cloreto de cobalto



34 % de Co

No solo

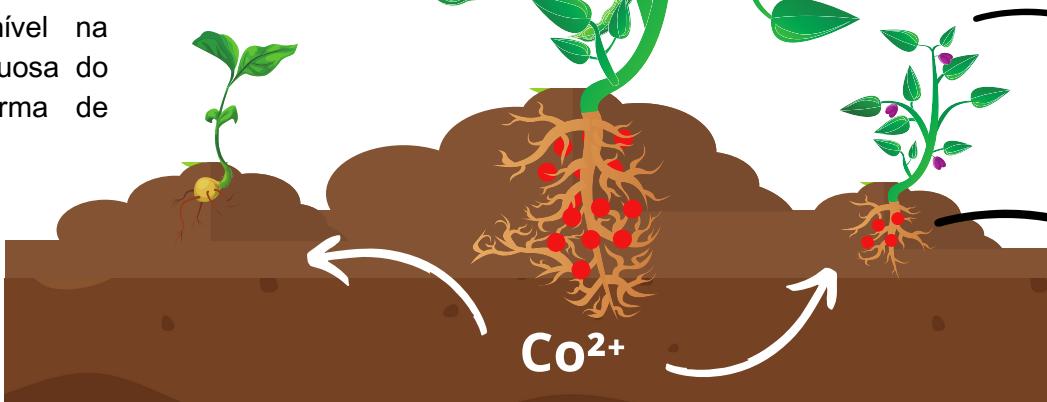
A mobilidade no solo é regida pelo pH e presença de oxigênio. Quanto maior o pH, menor é a disponibilidade.

Está disponível na solução aquosa do solo⁺ na forma de Co^{2+} .



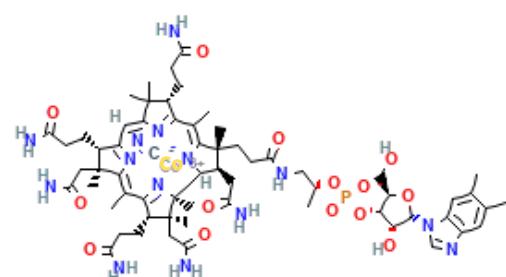
É encontrado, nas folhas dos vegetais, em concentração entre 0,03 a 1,0 mg/kg de matéria seca
Fonte: Embrapa.

Planta leguminosa em desenvolvimento
Fixação de nitrogênio



Incorporação e metabolismo do cobalto na planta

Absorvido como Co^{2+} e assimilado nos nódulos presentes nas raízes das leguminosas na forma da coenzima cobalimina B₁₂, fundamental para a produção de leghemoglobina. Esta enzima possui alta afinidade por O₂, dessa forma protegendo a nitrogenase (responsável pela redução do N₂ e conversão em NH₃), impedindo que ela seja exposta ao oxigênio, pois este elemento pode oxidá-la.



Ligação do cobalto (Co) a quatro átomos de nitrogênio (N) para a formação da estrutura da cobalimina B₁₂

Principais funções

Em *Rizobium* spp. e *Bradyrhizobium* sp. o Co é fundamental na ativação das enzimas cobaliminas: A metionina sintetase (envolvida na síntese de proteínas), ribonucleotídeos redutase (síntese de DNA) e a metilmalonil coenzima A mutase (envolvida na síntese de grupos heme).

A concentração de Co nas plantas pode variar de 0,1 a 10 mg/kg

Tratamento de sementes com Co é uma solução para deficiência do elemento em leguminosas.

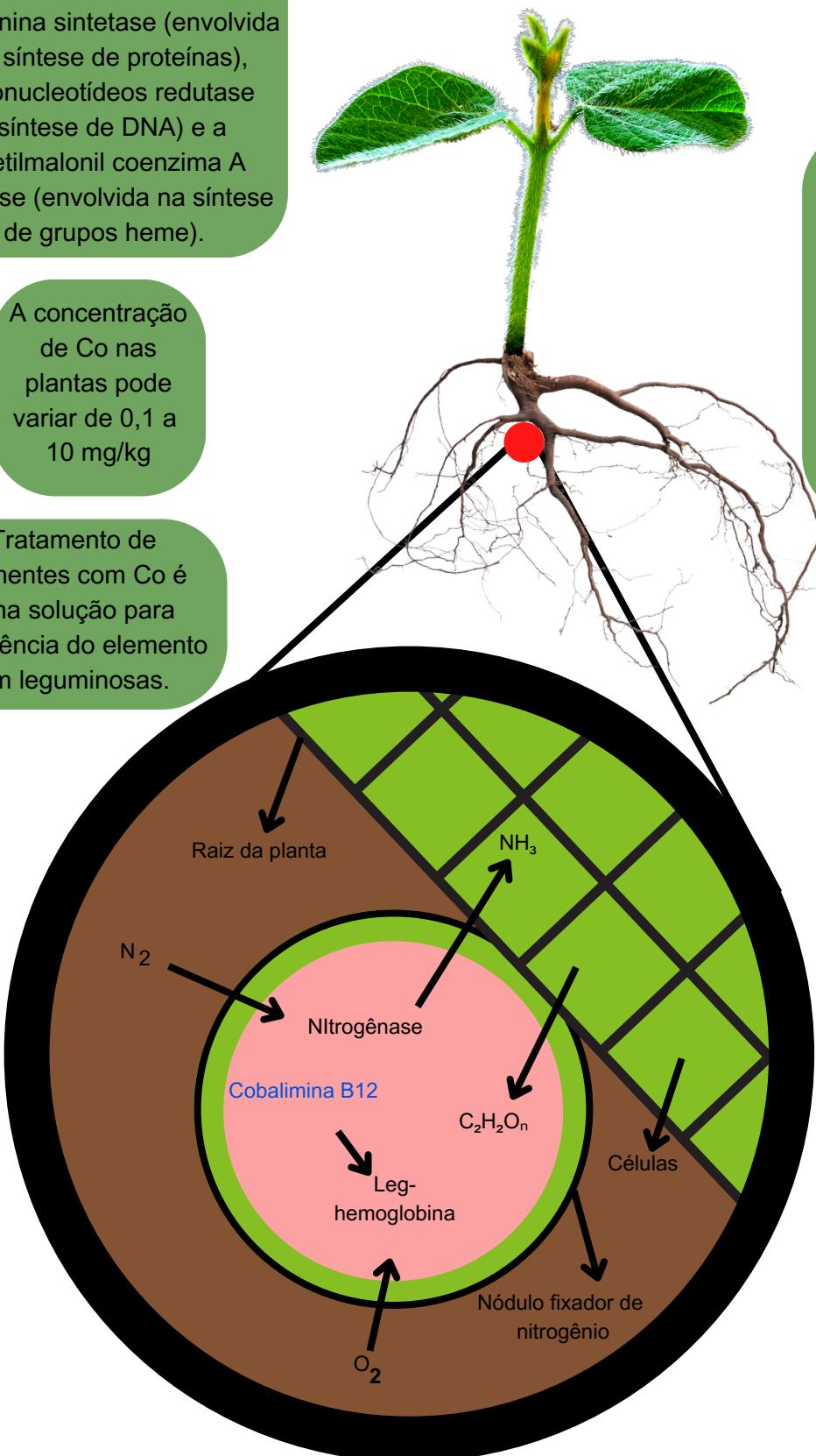
A aplicação foliar induz aumento de produtividade em leguminosas, devido à baixa disponibilidade no solo.

O Co está presente na coenzima Cobalamina B12 nos nódulos. Sendo o Co um metal central quelatado por quatro átomos de N direcionados ao centro por anéis de porfirina.

O Co é fundamental para que ocorra o processo de fixação biológica de nitrogênio nos nódulos de leguminosas, influenciando diretamente na formação de leghemoglobina garantindo que o interior fique anaeróbico e aumente a eficiência do complexo nitrogenase

Para soja, recomenda-se aplicação de 2 a 3 g de Cobalto por hectare, evitando-se toxidez. A deficiência de Co em leguminosas gera sintomas de falta de nitrogênio, amarelecimento de folhas.

O Co também pode participar do funcionamento do metabolismo de não leguminosas, envolvido na menor senescência de folhas e maior atividade de células.

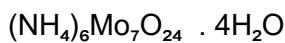


Molibdênio (Mo)

Identificado como nutriente em 1938 por Arnon e Stout este elemento está em diversos estados de oxidação no ambiente, porém não é encontrado puro. A principal forma de Mo na natureza é a molibdenita (MoS_2), fonte do elemento para indústria, onde é aplicado como catalisador. Esta é também a fonte primária do nutriente para produção de fertilizantes. Em sistemas agrícolas a principal forma de Mo utilizada é o molibdato.

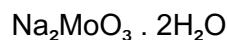
Principais fontes

Molibdato de amônio



54 % de Mo

Molibdato de sódio



42 % de Mo

Trióxido de molibdênio



66 % de Mo

Oxisulfatos

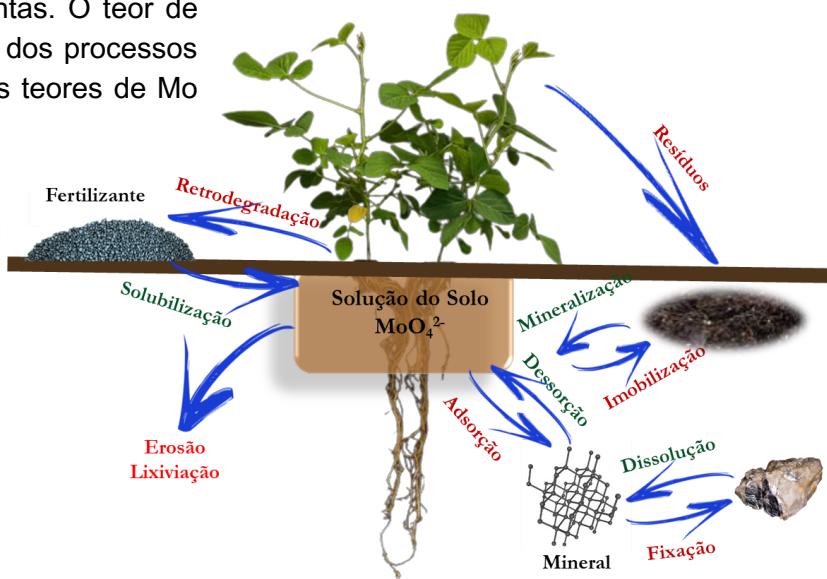
-

> 0,1 % de Mo

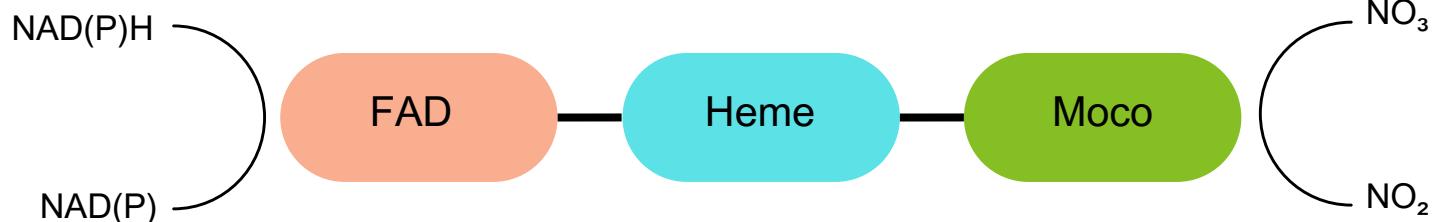
No solo

A principal forma de Mo na solução do solo é molibdato (MoO_4^{2-}), a qual tem afinidade por cátions, como o Fe, formando compostos não absorvidos pelas plantas. O teor de Mo no solo depende do material de origem e dos processos de formação. Solos ácidos apresentam menores teores de Mo em solução devido a adsorção aos óxidos.

Pouco se sabe sobre o teor ideal de Mo nos solos para o adequado desenvolvimento das culturas, isso porque os métodos de determinação de Mo são onerosos, fazendo com que as análises não contemplam este resultado rotineiramente. Além disso, sabe-se que a calagem, ao promover aumento de uma unidade de pH do solo aumenta a disponibilidade deste nutriente em solução.



Incorporação e metabolismo

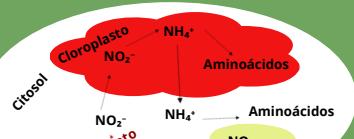


Fonte: adaptado de Fernandes et al. (2018)

São conhecidas mais de 50 enzimas que dependem de Mo para seu adequado funcionamento, porém em plantas apenas cinco foram identificadas. A absorção de Mo é realizada por transportadores específicos de alta afinidade. Após absorção o Mo será acumulado no vacúolo como molibdato ou quelatado por uma pterina, formando o Moco. Esta estrutura faz parte de enzimas, como a nitrato redutase, facilitando a transferência de elétrons nas reações.

Principais funções

Participa da enzima nitrato redutase, a primeira no processo de transformação de NO_3^- em NH_4^+ nas plantas. Em baixas concentrações de Mo a planta pode apresentar clorose generalizada, semelhante a deficiência de N e acúmulo NO_3^- nos vacúolos.



Fonte: adaptado de Ohyama et al. (2017)

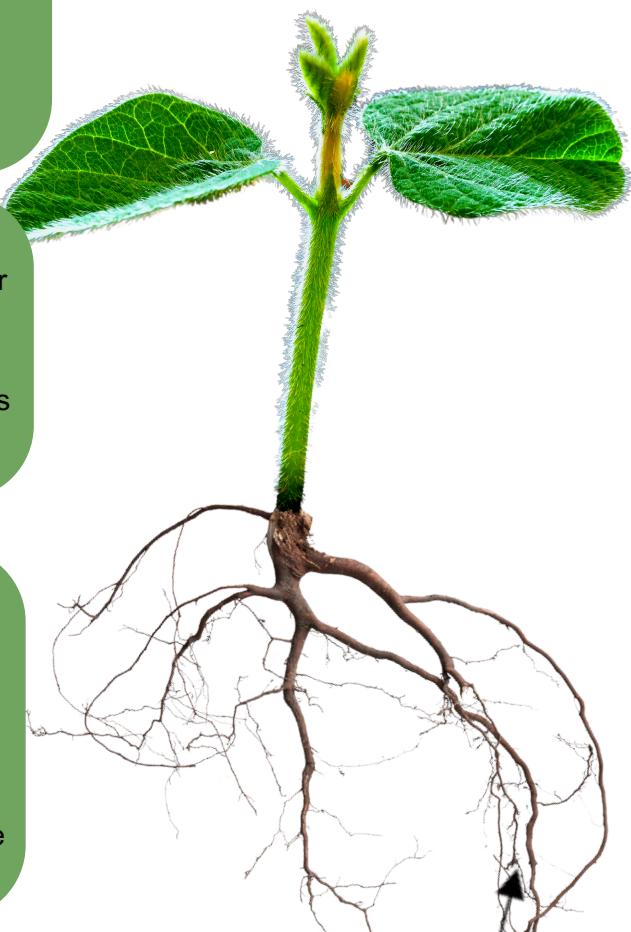
Deficiência: $<1 \text{ mg kg}^{-1}$
Teor ideal: 1-5 mg kg^{-1}

O nutriente se movimento no solo devido ao fluxo de massa.

Não é comum o relato de toxidez em plantas, porém altos teores de Mo nas folhas, principalmente forragens, são prejudiciais devido a transtornos intestinais causados nos animais, a molibdenose.

Apresenta mobilidade no xilema e floema.

Participa da enzima sulfito oxidase. Responsável por oxidar sulfito a sulfato, reduzindo a toxidez. O sulfito é formado durante a hidrólise de compostos sulfatados.

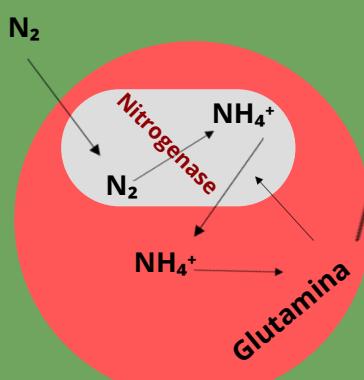


Enzima responsável pela última etapa na síntese de ABA, hormônio sintetizado prioritariamente nas folhas. O ABA atua na quebra de dormência de sementes e no fechamento de estômato, dentre outras funções na planta.

Ocorre nas folhas velhas. Os primeiros sintomas são pontuações levemente amareladas que evoluem para necrose.



Constituinte do Fe-Moco presente na enzima nitrogenase. Enzima responsável pela hidrólise de N_2 nos nódulos. Baixas concentrações de Mo reduzem a fixação biológica.



O processo de FBN resultou na economia de aproximadamente 15,2 bilhões em fertilizante no Brasil (2019-2020), sendo o principal método para suprir a demanda de N na cultura da soja.

Cloro (Cl)

O cloro é um micronutriente e desempenha papel relacionado ao ajuste de potencial hídrico e eletroquímico celular, além da participação na reação de Hill, na etapa de fotólise da água na fotossíntese. O cloro pode ser encontrado na forma de NaCl nas águas marinhas e em rochas, ou então ligado aos elementos potássio e magnésio no mineral carnalita.

Principais fontes

Cloreto de sódio

NaCl

50 % de Cl

Carnalita

KMgCl₃.6H₂O

47 % de Cl

Cloreto de potássio

KCl

50 % de Cl

Cloreto de cálcio

CaCl₂

67 % de Cl

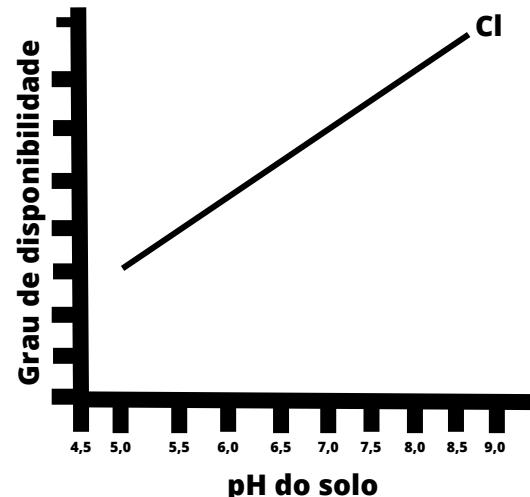
Cloreto de magnésio

MgCl₂

51 % de Cl

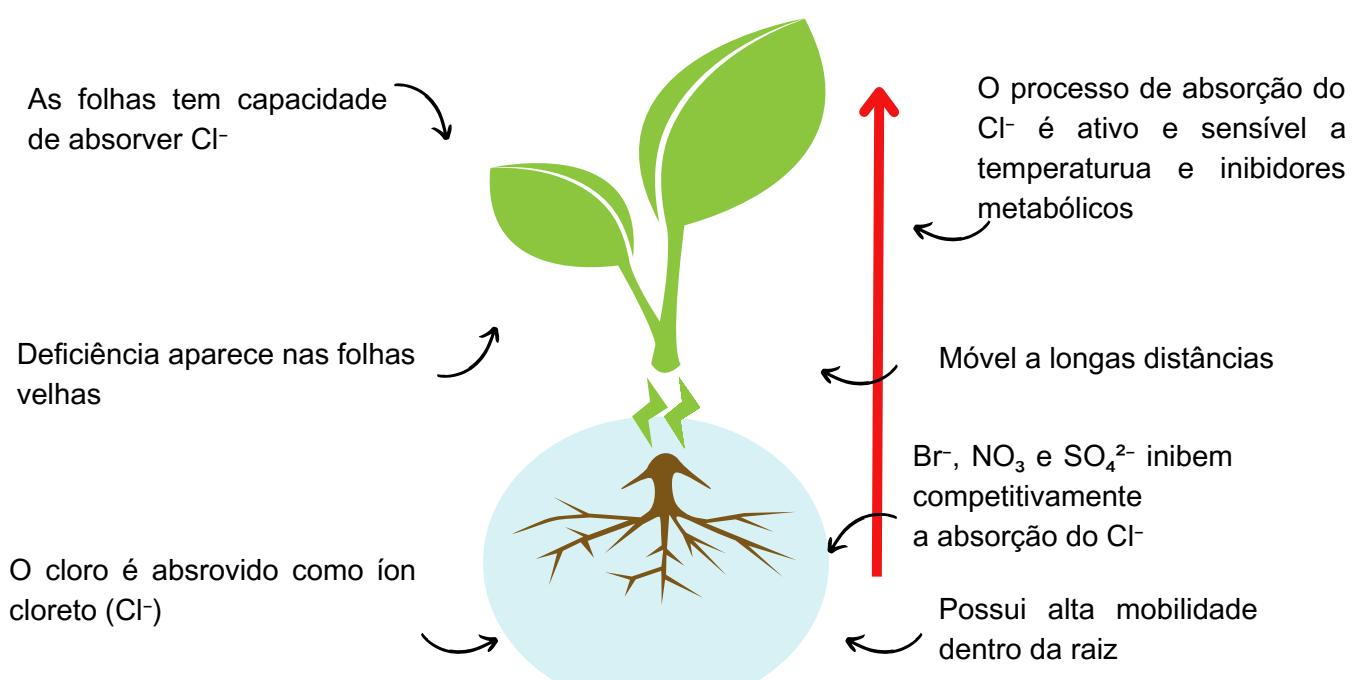
No solo

O cloro no solo é proveniente de chuvas, do depósito pelos ventos marinhos ou então pela adição de fertilizantes como KCl, CaCl₂ e MgCl₂. Por ser adicionado ao solo em conjunto com macronutrientes, a ocorrência de deficiência deste elemento é muito rara, sendo mais comum o consumo de luxo ou até mesmo toxidez, a qual por sua vez é menos frequente devido a facilidade de lixiviação do cloro. Por se tratar de um micronutriente aniónico, sua disponibilidade aumenta linearmente com o aumento do pH.



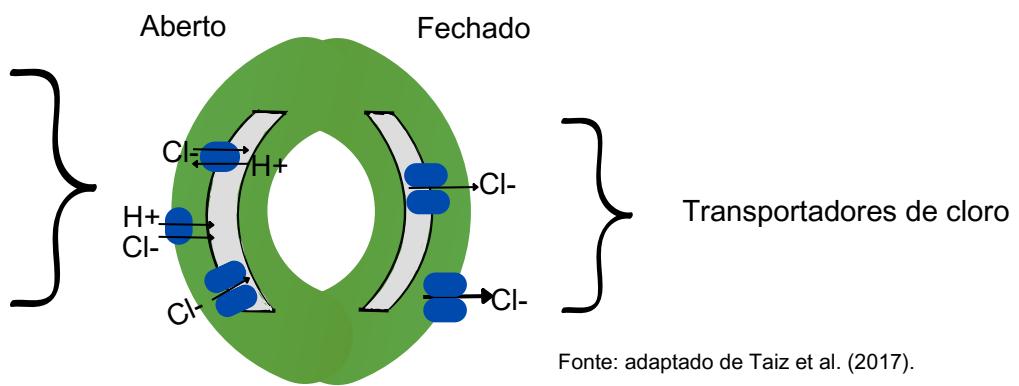
Fonte: adaptado de Malavolta (1979)

Incorporação e metabolismo

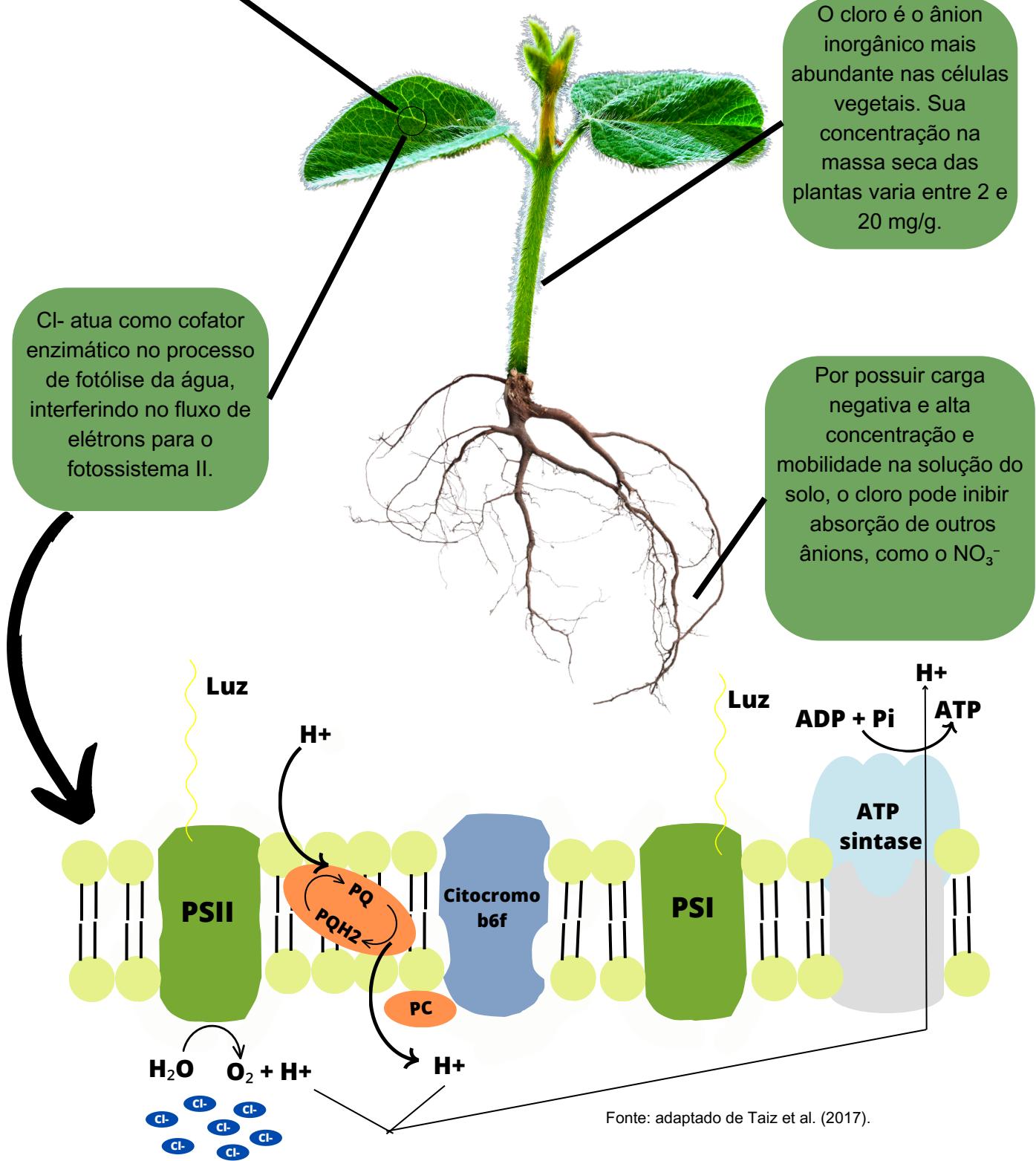


Principais funções

Um dos papéis do cloreto é regular o turgor celular, participando da abertura e fechamento dos estômatos



Fonte: adaptado de Taiz et al. (2017).



Fonte: adaptado de Taiz et al. (2017).

Iodo (I) e Selênio (Se)

São elementos-traço essenciais para os animais e humanos, tanto que a baixa disponibilidade desses nutrientes na alimentação é prejudicial para a saúde. Apesar de não serem essenciais para as plantas, esses podem ser incorporados e acumulados, além de poderem apresentar efeitos no desenvolvimento delas. A biofortificação com Se e I é um meio para suprir esses nutrientes para a dieta a partir da acumulação desses nos vegetais.

Principais fontes

Selenato de sódio



42 % de Se

Selenito de sódio



46 % de Se

Ambos os elementos são naturalmente encontrados na atmosfera, solo, mares e oceanos.

Iodeto de potássio



76 % de I

Iodato de potássio



59 % de I

No solo

A abundância das formas iônicas de cada elemento depende das condições de pH e de potencial eletroquímico do solo. Caso essas condições tornem o meio oxidado, de caráter aeróbico, as formas mais abundantes serão selenato e iodato. E em um meio de caráter anaeróbico os ânions selenito e iodeto serão mais elevados.



Incorporação e metabolismo

Selênio (Se)



Transportadores de sulfato (S)

Transportadores de fósforo (P)

Transportadores de influxo de silício (Si)

Iodo (I)



Transportadores de cloro (Cl)

Transportadores Na-K/Cl

Absorção da atmosfera pelas folhas

Principais funções

Altas concentrações de Se e I apresentam efeitos prejudiciais no crescimento das plantas, mas, em faixas não tóxicas, tais elementos podem proporcionar efeitos benéficos diversos dependendo da espécie da cultura, fonte, concentração e tipo de aplicação.

Além do aumento da concentração desses elementos nos tecidos, também foi observado um aumento de biomassa nos vegetais folhosos a partir da aplicação de iodo, e aumento da atividade de enzimas e compostos antioxidantes na soja e no tomate, respectivamente. Já os tomates biofortificados com selênio apresentaram mais flavonoides e compostos fenólicos, uma vez que o selênio interfere na síntese de compostos fenólicos.

Os efeitos da toxicidade por selênio nas cultivares mais comuns podem ser observados em concentrações acima de 4 mg/kg. Há o aparecimento de clorose internerval ou manchas pretas, manchas rosas na raiz e branqueamento ou amarelecimento das folhas novas.

Não são essenciais para as plantas, mas sua aplicação provoca efeitos diversos: tóxicos ou benéficos.

Os efeitos tóxicos aparecem em concentrações acima de 0,5 a 1 mg/kg de iodo no solo e na solução nutritiva. E os efeitos estimulantes podem ser observados em concentrações reduzidas de 0,1 mg/kg.

Algumas culturas de resposta positiva à biofortificação com Se

Castanhas, leguminosas, crucíferas (brócolis, couve, mostarda), alho, cebola, tomate, arroz e trigo.

Uma vez absorvido, o Se é translocado para as folhas e grãos. Nos tecidos, a partir do Se são sintetizados os aminoácidos selenocisteína e selenometionina, a partir da mesma rota metabólica que o enxofre. Estes aminoácidos farão parte de proteínas.

É indicado o uso da aplicação foliar para um enriquecimento dos frutos e grãos.

Algumas culturas de resposta positiva à biofortificação com I

Folhosas (espinafre, alface, repolho e outras), tomate, morango.

Ambos compartilham da mesma rota metabólica, então os efeitos tóxicos do iodo podem ser reduzidos na presença de concentrações elevadas de cloro.

O iodo pode ser absorvido diretamente da atmosfera pelos estômatos e cutículas em concentrações significativas.

Há outras rotas metabólicas em que o selênio é convertido em seleneto de dimetilo como produto final, um composto que é facilmente volatilizado.

Raízes e folhas acumulam mais iodo que frutas ou sementes. Esse apresenta mobilidade reduzida via floema.



Referências

- BUECHEL, T. **Role of Nickel in Plant Culture**. PRO-MIX Greenhouse Growing. Quakertown, PA, 2023. Disponível em: <https://www.pthorticulture.com/en/training-center/role-of-nickel-in-plant-culture/>
- CANTARELLA, H. et al. **Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas, SP: IAC, 2022. (Boletim, 100).
- DE BANG, T. C. et al. The molecular-physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. **New Phytologist**, v. 229, n. 5, p. 2446-2469, 2021.
- FAGAN, E. B. et al. **Fisiologia vegetal**: metabolismo e nutrição mineral. São Paulo, SP: Andrei Editora, 2016.
- FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. de; SANTOS, L. A. **Nutrição mineral de plantas**. 2. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018.
- JOHNSON, J. What Is Superoxide Dismutase? **Plant Medicine News**, 17 Apr. 2018. Disponível em: www.plantmedicinewebs.com/2018/04/what-is-superoxide-dismutase/.
- LAMBERS, H. et al. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: matching morphological and physiological traits. **Annals of Botany**, v. 98, n. 4, p. 693-713, 2006.
- MARSCHNER, H. (Ed.). Marschner's mineral nutrition of higher plants. Cambridge, MA: Academic Press, 2011.
- MALAVOLTA, E. **ABC da Adubação**. São Paulo, SP: Agronômica Ceres, 1979. 256 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. Piracicaba, SP: Potafos, 1997.
- OHYAMA, T. et al. Amino acid metabolism and transport in soybean plants. In: ASAO, T.; ASADUZZAMAN, M. (eds.). **Amino acid**. New insights and roles in plant and animal. London, UK: InTech Open, 2017. p. 171-196.
- REHM, G.; SCHMITT, M. **Zinc for crop production**. Minneapolis, MI: University of Minnesota, 2002. (Extension Publicaiton, FO-00720-GO).
- SOUZA, D. M. G. de et al. **Manejo da adubação fosfatada para culturas anuais no cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2016. (Circular Técnica, 33).
- TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre, RS: Artmed, 2017.
- TAJER, A. **What Is the Function of Sulfur (S) in Plants?** Santa Fe, CA: Greenway Biotech, 2020. Disponível em: www.greenwaybiotech.com/blogs/gardening-articles/what-is-the-function-of-sulfur-in-plants.
- TELLES, T. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Economic value of biological nitrogen fixation in soybean crops in Brazil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 31, art. 103158, 2023.
- TRUOG, E. Soil reaction infuence on availability of plant nutrients. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 11, p. 305-308, 1946.
- VOGT, L. et al. Oxygen-evolving complex of Photosystem II: an analysis of second-shell residues and hydrogen-bonding networks. **Current Opinion in Chemical Biology**, v. 25, p. 152-158, 2015.
- WIKIPEDIA. **Vitamina B 12**. 11 May 2023. Disponível em: pt.wikipedia.org/wiki/Vitamina_B_12.
- YRUELA, I. Copper in plants: acquisition, transport and interactions. **Functional Plant Biology**, v. 36, n. 5, p. 409-430, 2009.