

**UNIDADE IV – NUTRIÇÃO MINERAL DE PLANTAS - ELEMENTOS ESSENCIAIS**

- 4. ELEMENTOS ESSENCIAIS**
- 4.1. DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO**
- 4.2. TÉCNICAS UTILIZADAS NO ESTUDO DA NUTRIÇÃO MINERAL**
- 4.3. RELAÇÃO SINTOMA x FUNÇÃO**
- 4.4. PRINCIPAIS FUNÇÕES E SINTOMAS DE DEFICIÊNCIA**

**Segundo os critérios de essencialidade estabelecidos por Arnon & Stout (1939), o elemento é essencial quando atende aos três critérios seguintes:**

- **O elemento deve estar diretamente envolvido no metabolismo da planta (como constituinte de molécula, participar de uma reação, etc.);**
- **A planta não é capaz de completar o seu ciclo de vida na ausência do elemento;**
- **A função do elemento é específica, ou seja, nenhum outro elemento poderá substituí-lo naquela função;**

**Definição de elemento essencial**

- **Segundo Arnon & Stout (1939), um elemento essencial é aquele cuja ausência impede uma planta de completar seu ciclo de vida.**
- **Segundo Epstein (1999), um elemento essencial é aquele que tem um papel fisiológico definido na planta.**

**Observações:**

- 1) Os nutrientes minerais são classificados como macro ou micronutrientes, de acordo com suas concentrações relativas no tecido vegetal.
  - **Macronutrientes: acima de 1.000 mg/Kg de MS;**
  - **Micronutrientes: abaixo de 100 mg/Kg de MS.**
- 2) Mengel & Kirkby (1987) propuseram que, **em vez de macro e micronutrientes**, os nutrientes minerais fossem classificados de acordo com seu papel bioquímico e sua função fisiológica na planta.

**TABLE 5.1**  
Tissue levels of essential elements required by most plants (Part 1)

Element	Chemical symbol	Concentration in dry matter (% or ppm)*	Relative number of atoms with respect to molybdenum
<b>Obtained from water or carbon dioxide</b>			
Hydrogen	H	6	60,000,000
Carbon	C	45	40,000,000
Oxygen	O	45	30,000,000
<b>Obtained from the soil</b>			
<b>Macronutrients</b>			
Nitrogen	N	1.5	1,000,000
Potassium	K	1.0	250,000
Calcium	Ca	0.5	125,000
Magnesium	Mg	0.2	80,000
Phosphorus	P	0.2	60,000
Sulfur	S	0.1	30,000
★ Silicon	Si	0.1	30,000
<b>Micronutrients</b>			
Chlorine	Cl	100	3,000
Iron	Fe	100	2,000
Boron	B	20	2,000
Manganese	Mn	50	1,000
☼ Sodium	Na	10	400
Zinc	Zn	20	300
Copper	Cu	6	100
Nickel	Ni	0.1	2
Molybdenum	Mo	0.1	1

Source: Epstein 1972, 1999.  
\*The values for the nonmineral elements (H, C, O) and the macronutrients are percentages. The values for micronutrients are expressed in parts per million.

- ### Elementos benéficos: Cobalto, Selênio e Alumínio
- **Cobalto** → Essencial para a fixação simbiótica do nitrogênio (faz parte da cobalamina, vitamina B<sub>12</sub>);
  - **Selênio** → Evita o excesso de fosfato e aumenta a resistência da planta contra ataque de insetos. Pode substituir o enxofre;
  - **Alumínio** → A baixa [Al] tem efeito indireto, traz benefícios para o crescimento em beterraba, milho e algumas leguminosas tropicais;
  - **Sódio** → É essencial para as plantas C<sub>4</sub> e CAM (Regeneração do PEP), já para as plantas C<sub>3</sub>, ele aumenta a expansão celular;
  - **Silício** → É essencial para a cavalinha ou junco de polimento (Pteridófito), para as outras plantas o Si aumenta a resistência mecânica da parede celular e a resposta contra patógenos.

<u>ELEMENTOS</u>		<u>MACRONUTRIENTES</u>
C	Retirados da atmosfera e da água	CO <sub>2</sub>
H		H <sub>2</sub> O
O		O <sub>2</sub>
K	Absorvidos do solo como cátions	K <sup>+</sup>
Ca		Ca <sup>2+</sup>
Mg		Mg <sup>2+</sup>
N	Absorvidos do solo como ânions	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )
P		H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )
S		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Si		Si(OH) <sub>4</sub>

<u>ELEMENTOS</u>		<u>MICRONUTRIENTES</u>
B	Absorvidos do solo como:	BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup> (B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup> )
Cl		Cl <sup>-</sup>
Cu		Cu <sup>2+</sup> (Cu <sup>+</sup> )
Fe		Fe <sup>2+</sup> (Fe <sup>3+</sup> )
Mn		Mn <sup>2+</sup>
Mo		MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Zn		Zn <sup>2+</sup>
Na		Na <sup>+</sup>
Ni		Ni <sup>2+</sup>

### Técnicas utilizadas no estudo da nutrição mineral

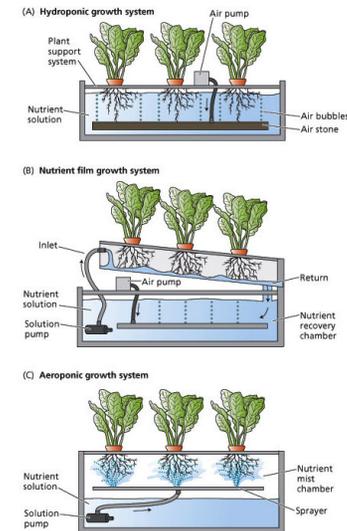
Para demonstrar a essencialidade de um elemento, é requerida a ausência somente do elemento em estudo no meio nutritivo.

Tal condição é extremamente difícil de ser obtida em meio complexo como o solo.

No século XIX, De Saussure, Sachs, Boussingault e Knop demonstraram que as plantas podiam crescer normalmente usando solução nutritiva (meio líquido contendo somente sais inorgânicos) e energia solar.

Esta técnica é hoje conhecida como hidroponia e tem sido utilizada em inúmeros estudos de nutrição mineral.

O método mais popular é o da solução nutritiva em hidropônica, porém usa-se também o cultivo em filme de solução nutritiva (usado na produção comercial) e em solução nutritiva em aeropônica.



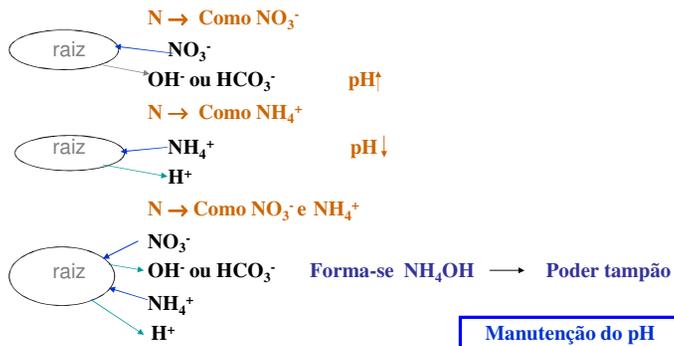
### Cuidados especiais requeridos no uso de soluções nutritivas (cultivo hidropônico)

- Usar grandes volumes e efetuar mudanças frequentes da solução;
- Ajustar as concentrações dos nutrientes (diminuição de 50% na  $[K^+]$  é usada como indicadora para troca da solução);
- Ajustar o pH do meio com HCl ou NaOH;

- Fornecer um suprimento de  $O_2$  adequado para permitir a respiração das raízes (aeração);
- Para evitar carência de Fe, usa-se agentes quelantes, como o EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) ou DTPA (ácido dietilenotriaminopentaacético);

**Obs:** O uso de  $FeSO_4$  ou  $Fe(NO_3)_2$ , o ferro pode precipitar da solução como hidróxido de ferro, tornando-o indisponível.

- Fornecer nitrogênio na forma de  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NH}_4^+$ .



A solução nutritiva deve fornecer os elementos essenciais em concentrações que permitam o rápido crescimento da planta, devendo-se ter o cuidado para que os mesmos não atinjam níveis tóxicos.

Tabela 2 – Concentrações de nutrientes em duas soluções nutritivas e na solução de um solo

Elemento	Solução de Hoagland (Epstein, 1972)	Solução de Clark (Clark, 1975)	Solução de um solo (Marschner, 1995)
Macronutrientes (mM)			
Nitrogênio	16,0	8,0	3,200
Fósforo	2,0	1.300 X 0,14	0,0015
Enxofre	1,0	0,6	0,590
Potássio	6,0	1,87	0,510
Cálcio	4,0	2,6	1,700
Magnésio	1,0	0,6	0,490
Micronutrientes (µM)			
Ferro	35,0	45	-
Cobre	0,5	0,5	-
Zinco	2,0	2,0	0,480
Manganês	2,0	7,0	0,002
Molibdênio	0,5	0,6	-
Boro	25	19	-
Cloro	50,0	950	-
Níquel	0,5	-	-

### Sintomas de deficiência

Os sintomas de deficiência de nutrientes em uma planta correspondem à expressão da desordem metabólica resultante do suprimento insuficiente de um elemento essencial.

• Estas desordens estão relacionadas com as funções desempenhadas pelo elemento no funcionamento da planta;

• Cultivo hidropônico X Cultivo no solo;

- Mobilidade dos nutrientes dentro da planta:

➤ Elementos móveis → folhas velhas;

➤ Elementos imóveis → folhas novas e gemas.

TABLE 5.4  
 Mineral elements classified on the basis of their mobility within a plant and their tendency to retranslocate during deficiencies

Mobile	Immobile
Nitrogen	Calcium
Potassium	Sulfur
Magnesium	Iron
Phosphorus	Boron
Chlorine	Copper
Sodium	
Zinc	
Molybdenum	

Note: Elements are listed in the order of their abundance in the plant.

Portanto, para detectar a deficiência de determinado elemento em uma planta, com base somente em sintomas visuais, o agrônomo precisa ter grande experiência.

Além disso, os sintomas visuais só aparecem quando a deficiência já é severa.

Por outro lado, nas condições de campo, de modo geral, as deficiências são múltiplas e os sintomas visuais se complicam ainda mais.

Portanto, o agrônomo interessado em diagnosticar deficiências minerais, deve utilizar: A análise do solo, seguida de análise da planta e por último observação de sintomas visuais.

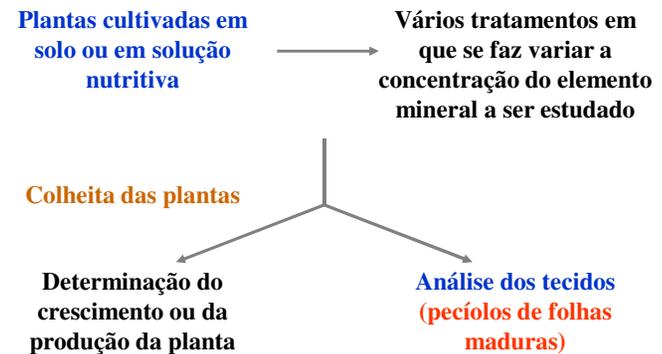
A análise do solo fornece dados sobre a quantidade total de reservas em nutrientes minerais existentes no solo.

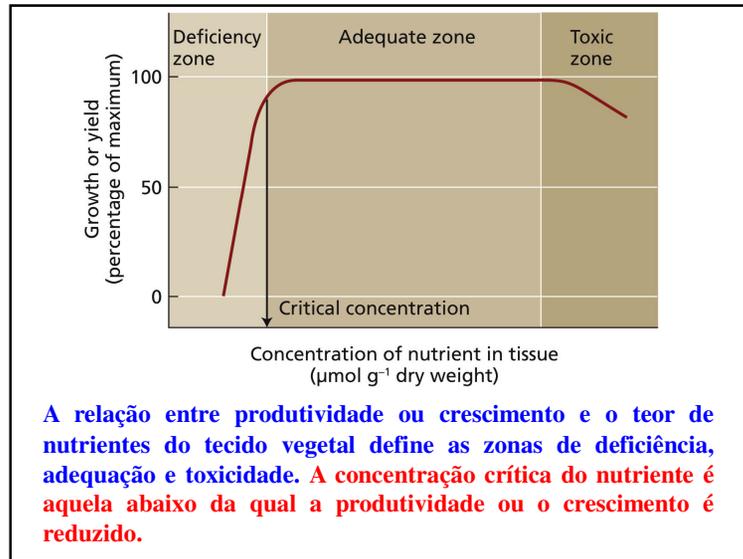
Porém, a potencialidade de certos elementos nem sempre é real, daí a necessidade de complementação da análise do solo com a análise de plantas.

A análise de plantas é um método utilizado para a determinação do “status” nutricional da planta, através da medida da concentração de nutrientes em amostras de tecidos.

Geralmente usa-se pecíolos de folhas maduras.

Relação entre o crescimento da cultura e a concentração de um dado elemento mineral em amostras de tecidos.





### Classificação dos nutrientes minerais de acordo com sua função bioquímica

**TABLE 5.2**  
Classification of plant mineral nutrients according to biochemical function (Part 1)

Mineral nutrient	Functions
<b>Group 1</b>	<b>Nutrients that are part of carbon compounds</b>
N	Constituent of amino acids, amides, proteins, nucleic acids, nucleotides, coenzymes, hexosamines, etc.
S	Component of cysteine, cystine, methionine. Constituent of lipoic acid, coenzyme A, thiamine pyrophosphate, glutathione, biotin, 5'-adenylsulfate, and 3'-phosphoadenosine.
<b>Group 2</b>	<b>Nutrients that are important in energy storage or structural integrity</b>
P	Component of sugar phosphates, nucleic acids, nucleotides, coenzymes, phospholipids, phytic acid, etc. Has a key role in reactions that involve ATP.
Si	Deposited as amorphous silica in cell walls. Contributes to cell wall mechanical properties, including rigidity and elasticity.
B	Complexes with mannitol, mannan, polymannuronic acid, and other constituents of cell walls. Involved in cell elongation and nucleic acid metabolism.

*Source: After Evans and Sorger 1966 and Mengel and Kirkby 2001.*

**TABLE 5.2**  
Classification of plant mineral nutrients according to biochemical function (Part 2)

Mineral nutrient	Functions
<b>Group 3</b>	<b>Nutrients that remain in ionic form</b>
K	Required as a cofactor for more than 40 enzymes. Principal cation in establishing cell turgor and maintaining cell electroneutrality.
Ca	Constituent of the middle lamella of cell walls. Required as a cofactor by some enzymes involved in the hydrolysis of ATP and phospholipids. Acts as a second messenger in metabolic regulation.
Mg	Required by many enzymes involved in phosphate transfer. Constituent of the chlorophyll molecule.
Cl	Required for the photosynthetic reactions involved in O <sub>2</sub> evolution.
Mn	Required for activity of some dehydrogenases, decarboxylases, kinases, oxidases, and peroxidases. Involved with other cation-activated enzymes and photosynthetic O <sub>2</sub> evolution.
Na	Involved with the regeneration of phosphoenolpyruvate in C <sub>4</sub> and CAM plants. Substitutes for potassium in some functions.
<b>Group 4</b>	<b>Nutrients that are involved in redox reactions</b>
Fe	Constituent of cytochromes and nonheme iron proteins involved in photosynthesis, N <sub>2</sub> fixation, and respiration.
Zn	Constituent of alcohol dehydrogenase, glutamic dehydrogenase, carbonic anhydrase, etc.
Cu	Component of ascorbic acid oxidase, tyrosinase, monoamine oxidase, uricase, cytochrome oxidase, phenolase, laccase, and plastocyanin.
Ni	Constituent of urease. In N <sub>2</sub> -fixing bacteria, constituent of hydrogenases.
Mo	Constituent of nitrogenase, nitrate reductase, and xanthine dehydrogenase.

*Source: After Evans and Sorger 1966 and Mengel and Kirkby 2001.*

### Funções do fósforo (P)

**Parte constituinte de:**

- **Ácidos nucleicos (DNA e RNA);**
- **Fosfolipídios e açúcares-fosfato;**
- **Coenzimas (NADP);**
- **Especialmente do ATP (composto rico em energia que participa de vários processos metabólicos, tais como: síntese e degradação de carboidratos, síntese de proteínas e de ácidos graxos).**

**O fósforo sofre fácil redistribuição pelo floema.**

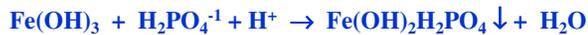
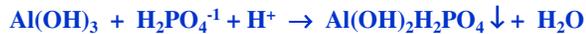
### Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo (P) do solo para a planta

- **pH do solo:**

pH do solo	forma de P disponível
Ácido (< 5)	$\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$
Neutro (5 – 7)	$\text{HPO}_4^{-2}$
Básico (> 7)	$\text{PO}_4^{-3}$

- **Presença de Fe e Al:**

A presença de Fe e Al em solo ácido induz a formação de sais insolúveis:



- **Presença de cálcio:**

A presença de  $\text{Ca}^{2+}$  em solo alcalino favorece a formação de fosfatos cálcicos:

Fosfato monocálcico  $\rightarrow \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \rightarrow$  solúvel  $\rightarrow$  absorvido pela planta;

Fosfato dicálcico  $\rightarrow \text{Ca}_2(\text{HPO}_4)_2 \rightarrow$  pouco solúvel  $\rightarrow$  pouco absorvido pela planta;

Fosfato tricálcico  $\rightarrow \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \rightarrow$  insolúvel  $\rightarrow$  não é absorvido pela planta.

**Obs:** para a obtenção de uma boa nutrição de P a melhor faixa de pH do solo é entre 5,5 e 6,5 ( $\text{HPO}_4^{-2}$ ).

### Funções do potássio (K)

- **Atua como ativador enzimático em vários processos metabólicos, tais como: Respiração, síntese de carboidratos e proteínas e reações de fosforilação;**

- **Participa na regulação da abertura e fechamento dos estômatos;**

- **Regulação do transporte de carboidratos (sacarose) produzidos pelas folhas;**

**Sofre fácil redistribuição pelo floema (a concentração de  $\text{K}^+$  no xilema e floema é praticamente a mesma).**

### Funções do cálcio (Ca)

- **É parte constituinte da parede celular** (pectatos de cálcio e magnésio na lamela média);

- **Manutenção da integridade funcional de membranas;**

- **Neutralização de ácidos orgânicos** (quelção), evitando sua toxicidade;

- **É necessário ao desenvolvimento e funcionamento de raízes.**

**Não sofre redistribuição encontrando-se na planta sob formas insolúveis na água como quelatos.**

### Funções do magnésio (Mg)

- É parte constituinte da clorofila;
- É necessário para a absorção de fósforo;
- Atua como ativador enzimático em vários processos, tais como: metabolismo glicídico e de ácidos nucléicos.

Elevada concentração de  $K^+$  inibe a absorção de  $Mg^{2+}$ .

### Funções do enxofre (S)

- É parte constituinte de proteínas e de coenzimas (tais como: Biotina, tiamina e CoA);
- Atua como ativador enzimático ( $SO_4^{2-}$ );
- Participa do sítio ativo de enzimas (R-SH);
- Na fotossíntese atua na síntese de clorofila, absorção de  $CO_2$  e atividade da Rubisco.

Absorvido pelas raízes principalmente como  $SO_4^{2-}$  e sob a forma orgânica (aminoácidos) e pelas folhas como  $SO_2$  (gás) e enxofre elementar (S).

### Funções do ferro (Fe)

- É parte constituinte dos citocromos;
- Atua como ativador enzimático;
- É parte constituinte de coenzimas que atuam em vários processos metabólicos, tais como: Síntese de proteínas e clorofila, fixação do  $N_2$  e transporte de elétrons na respiração e fotossíntese.

Em solos ácidos, a presença de  $Mn^{2+}$  inibe a absorção de  $Fe^{2+}$ ;

A calagem excessiva torna o  $Fe^{2+}$  insolúvel, diminuindo a sua disponibilidade para a planta.

### Funções do manganês (Mn)

- É necessário para a formação do cloroplasto e síntese de clorofila;
- Atua no transporte de elétrons na fotossíntese;
- Atua como ativador metálico de várias enzimas, tais como: Descarboxilases, hidrolases e RNA polimerase.

Sofre pouca redistribuição pelo floema.

Baixo pH e falta de aeração facilitam a formação de  $Mn^{2+}$ .

### Funções do molibdênio (Mo)

- Participa do metabolismo do nitrogênio: A redutase do nitrato e a nitrogenase tem Mo e Fe nas suas estruturas.

O Mo é o micronutriente que se encontra em menor quantidade tanto no solo quanto na planta.

O aumento de pH do solo eleva a disponibilidade de  $\text{MoO}_4^-$ , inversamente ao que ocorre com  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$ .

O  $\text{SO}_4^{2-}$  tem efeito inibitório na absorção de  $\text{MoO}_4^-$ , enquanto o fósforo tem efeito sinérgico.

### Funções do zinco (Zn)

- Participa como ativador enzimático na biossíntese do triptofano (precursor da auxina natural, o ácido indol acético);

- Atua na regulação da atividade da ribonuclease que hidrolisa o RNA (causa diminuição da síntese protéica).

Nos solos brasileiros a carência de zinco é tão comum quanto à de boro.

### Funções do boro (B)

- É necessário para a formação da parede celular;
- É necessário para a divisão e crescimento celulares;
- Atua no transporte de carboidratos.

Não sofre redistribuição pelo floema

### Funções do cobre (Cu)

- Atua como ativador metálico das enzimas envolvidas no transporte de elétrons na respiração e fotossíntese;

- Tem participação indireta na fixação simbiótica do nitrogênio regulando o nível de  $\text{O}_2$  nos nódulos de infecção.

### Funções do cloro (Cl)

- Participa do complexo de evolução de  $O_2$  (fotólise da água) do fotossistema II da fase fotoquímica da fotossíntese.

### Funções do níquel (Ni)

- Atua como cofator da enzima urease que é necessária para o crescimento da planta.

A sua deficiência raramente é observada em condições de campo.

### Funções do sódio (Na)

- É requerido para a regeneração do fosfoenolpiruvato (PEP) nas plantas  $C_4$  e CAM;
- Estimula o crescimento induzindo a expansão celular em plantas  $C_3$ . ✱

### Funções do silício (Si)

- É absorvido como ácido monossilícico  $[Si(OH)_4]$ ;
- Somente membros da família *Equisitaceae* (Uma pteridófita, cavalinha ou junco de polimento) requerem Si para completar seus ciclo de vida;
- Outras plantas quando supridas com Si apresentam melhoria no crescimento e fertilidade;
- O Si é depositado em paredes celulares, espaços intercelulares e retículo endoplasmático como sílica amorfa hidratada ( $SiO_2 \cdot nH_2O$ );
- Causa diminuição da toxicidade de vários metais pesados. ☆

### Principais sintomas de deficiência dos elementos essenciais

- Nitrogênio (N) – sua deficiência causa inibição do crescimento da planta. Se ela persiste, a maioria das plantas apresenta clorose nas folhas velhas. A intensificação da deficiência pode causar acúmulo de antocianina (cor púrpura) e queda da folha;
- Fósforo (P) – seu sintoma de deficiência característico é a coloração verde escura das folhas velhas associada ao acúmulo de antocianina (cor púrpura);
- Potássio (K) – o primeiro sintoma de deficiência é a clorose marginal que se desenvolve como necrose a partir do ápice, inicialmente, nas folhas velhas;

- **Enxofre (S)** – sua deficiência causa inibição do crescimento, clorose nas folhas jovens e acúmulo de antocianina;
- **Cálcio (Ca)** – Os sintomas de deficiência incluem necrose de regiões meristemáticas, onde a divisão celular e formação de parede celular são intensas;
- **Magnésio (Mg)** – um sintoma característico é a clorose internervural nas folhas velhas;

- **Ferro (Fe)** - um sintoma característico é a clorose internervural nas folhas jovens;
- **Cobre (Cu)** – o sintoma inicial de deficiência é a produção de folhas verde-escuras, que podem conter manchas necróticas. Sob deficiência severa, as folhas podem cair prematuramente;
- **Manganês (Mn)** – O principal sintoma de deficiência é uma clorose internervural com pequenas manchas necróticas. A clorose pode ocorrer em folhas jovens ou velhas, dependendo da espécie vegetal e da taxa de crescimento;

- **Zinco (Zn)** – Sua deficiência é caracterizada pela redução de crescimento internodal;
- **Molibdênio (Mo)** – A deficiência de mo pode aparecer como deficiência de N (adubado com nitrato ou fixação simbiótica);
- **Boro (B)** – podem exibir uma variedade de sintomas (como necrose de folhas jovens e gemas terminais) dependendo da espécie e idade da planta;
- **Cloro (Cl)** – a deficiência no campo não tem sido observada;

- **Níquel (Ni)** – plantas deficientes acumulam uréia nas folhas que pode causar necrose no ápice;
- **Silício (Si)** – plantas deficientes são mais suscetíveis ao acamamento e à infecção fúngica;
- **Sódio (Na)** – plantas C<sub>4</sub> e CAM sob deficiência de Na<sup>+</sup> exibem clorose e necrose ou deixam de florescer.