

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Crescimento e nutrição mineral da soja submetida a excesso
de P, S, K, Ca e Mg em solução nutritiva**

Magnus Dall’Igna Deon

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2007**

Magnus Dall'Igna Deon
Engenheiro Agrônomo

**Crescimento e nutrição mineral da soja submetida a excesso
de P, S, K, Ca e Mg em solução nutritiva**

Orientador:
Prof. Dr. **ANTONIO ROQUE DECHEN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2007**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Deon, Magnus Dall'Igna

Crescimento e nutrição mineral da soja submetida a excesso de P, S, K, Ca e Mg em
solução nutritiva / Magnus Dall'Igna Deon. - - Piracicaba, 2007.
71 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Cálcio 2. Distúrbios nutricionais de plantas 3. Enxofre 4. Fósforo 5. Magnésio
6. Nutrição vegetal 7. Potássio 8. Soja I. Título

CDD 633.34

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

AGRADECIMENTOS

Ao professor Antonio Roque Dechen, que me orientou em toda essa jornada.

Aos colegas e amigos do curso de pós-graduação.

Aos professores Quirino Augusto de Camargo Carmello, Francisco Antonio Monteiro e Carlos Tadeu dos Santos Dias.

À equipe técnica do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas da ESALQ/USP pelo auxílio na realização das análises químicas.

À COODETEC pelas sementes deste e de outros experimentos.

A Alessandra Monteiro de Paula e Marcelo Sparsa Menegasso, pelo muito que contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 Diagnose nutricional	9
2.2 Balanço nutricional.....	10
2.3 Nutrientes estudados.....	11
2.3.1 Fósforo	11
2.3.2 Potássio.....	13
2.3.3 Cálcio.....	15
2.3.4 Magnésio	17
2.3.5 Enxofre	18
2.4 Deficiência-induzida de micronutrientes	19
2.4.1 Cobre.....	19
2.4.2 Ferro.....	20
2.4.3 Zinco.....	21
3 MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 Instalação do experimento.....	22
3.2 Caracterização da variedade	23
3.3 Delineamento experimental	25
3.4 Composição das soluções nutritivas.....	25
3.5 Avaliações	28
3.6 Análises estatísticas	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1 Produção e partição da Fitomassa	30
4.1.1 Produção de massa seca	30
4.1.2 Produção de raízes.....	31
4.1.3 Relação Parte-Aérea/Raízes	32
4.2 Concentração de nutrientes nas folhas diagnósticas.....	34
4.2.1 Nitrogênio	34

4.2.2	Fósforo	35
4.2.3	Potássio.....	38
4.2.4	Cálcio.....	44
4.2.5	Magnésio	46
4.2.6	Enxofre	50
4.2.7	Boro	52
4.2.8	Cobre.....	53
4.2.9	Ferro.....	54
4.2.10	Manganês.....	55
4.2.11	Zinco.....	56
4.3	Sintomatologia sob excesso de fósforo	59
5	CONCLUSÕES	62
	REFERÊNCIAS.....	63

RESUMO

Crescimento e nutrição mineral da soja submetida a excesso de P, S, K, Ca e Mg em solução nutritiva

Um sistema de cultivo eficiente depende do correto manejo da nutrição das plantas. Desordens nutricionais podem ser induzidas por manejo da fertilização inadequada e excessiva, dentre elas toxidez e deficiência induzida de um nutriente por outro. Com o objetivo de avaliar o comportamento da soja cultivar CD-208 ao excesso de cinco macronutrientes em solução nutritiva, foi realizado um experimento em casa de vegetação. Os tratamentos constituíram-se de um controle baseado na solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) e soluções nutritivas iguais a essa, com a adição de 1,5; 3,0; 4,5 e 6,0 mmol_c L⁻¹ de um dos dois ânions (H₂PO₄⁻ e SO₄⁻²) acompanhado da mesma molaridade de carga de cada um dos três cátions (K⁺, Ca⁺² e Mg⁺²). O único nutriente que provocou toxidez às plantas foi o fósforo, acumulando-se nas folhas diagnósticas em concentrações de até 12,8 g kg⁻¹. Sob essa condição de toxidez, as plantas apresentaram clorose amarelo-amarronzada internerval nas folhas velhas que progrediu para necrose e abscisão, e acumularam menos massa seca, sofrendo alteração da relação entre parte aérea e raízes. Também apresentaram teores maiores de nitrogênio, enxofre e potássio, resultante da concentração destes nutrientes com a diminuição da massa seca e diminuição do teor de magnésio. Potássio e magnésio tiveram a concentração foliar aumentada pela sua maior concentração na solução, diferentemente do cálcio. A concentração foliar de cálcio foi menor com maiores concentrações de potássio e magnésio na solução nutritiva, mas potássio e magnésio não sofreram redução na concentração foliar com o aumento de outros cátions na solução. As mais altas concentrações de potássio na solução resultaram em menor concentração de ferro nos tecidos. O aumento na concentração de fósforo na solução nutritiva resultou na diminuição da concentração de cobre, mas não da concentração de zinco nas folhas diagnósticas.

Palavras-chave: Antagonismo; Toxidez; *Glycine max*; Fósforo; Enxofre; Potássio; Cálcio; Magnésio

ABSTRACT

Growth and mineral nutrition of soybean due to P, S, K, Ca and Mg excess in nutrient solution

An effective cultivation system depends on the adequate management of plant nutrition. Nutritional disorders may be induced by inadequate and excessive fertilization, and toxicity and deficiency may be induced by one nutrient on another. A greenhouse experiment was performed aiming to evaluate the behavior of the soybean cultivar CD-208 to excess of five macronutrients in nutrient solution. Treatments were a control based on the Hoagland and Arnon (1950) nutrient solution and similar solutions with the addition of 1.5, 3.0, 4.5 and 6.0 mmol_c L⁻¹ of the anions H₂PO₄⁻ or SO₄⁻² and the same molarity charge of each of the cations K⁺, Ca⁺² and Mg⁺². The only nutrient that caused toxicity to the plants was phosphorus, which accumulated in the diagnostic leaves in concentrations up to 12.8 g kg⁻¹. Under this condition of toxicity, plants presented a yellow-brownish interveinal chlorosis in the old leaves which progressed to necrosis and abscission, and accumulated less dry mass, modifying the shoot:root ratio. The leaves also presented higher nitrogen, sulfur and potassium content due to concentration effect as dry matter diminished, and lower magnesium content than the control plants. Potassium and magnesium had their leaf concentration increased by its higher concentration in the solution; the same doesn't happen with calcium. High magnesium and potassium rates significantly decreased calcium content in the leaves. However, potassium and magnesium concentrations were not influenced by increasing concentration of others cations in the nutrient solution. There was a decrease in the content of iron with increasing potassium concentration in the solution culture. High phosphorus rates in nutrient solution decreased copper content in leaves, but did not decrease zinc content.

Keywords: Interaction; Toxicity; *Glycine max*; Phosphorus; Sulfur; Potassium; Calcium; Magnesium

1 INTRODUÇÃO

A correta utilização de insumos, precedida de análises de solo ou de diagnose foliar garantem a manutenção da fertilidade do solo e de níveis elevados de produção, de forma sustentável, econômica e ambientalmente.

A utilização imponderada de fertilizantes e corretivos, no entanto, pode ser prejudicial ao desenvolvimento das plantas, constitui-se em fator antieconômico e em risco ao meio ambiente. A aplicação repetida de fertilizantes, sem a determinação da necessidade por análise de solo ou de tecido vegetal, pode acabar por elevar os valores de nutrientes antes deficientes a patamares excessivos e produzir efeitos contrários aos esperados.

De várias formas um nutriente em níveis excessivos pode prejudicar a produção. Antagonismos, toxidez e outros distúrbios nutricionais foram relatados em diversas situações, resultando em produtividades inferiores às esperadas de plantas corretamente nutridas.

A disponibilidade exagerada de um nutriente pode limitar a capacidade da planta de absorver e utilizar outros nutrientes, situação caracterizada como antagonística. Além disso, a interferência em processos fisiológicos pode resultar em produção inferior à ideal, sob o qual se caracteriza a toxidez.

Em sistemas agrícolas de manejo intensivo, desordens nutricionais por excesso de nutrientes podem ser mais importantes que as carências. Neste contexto, a capacidade de identificar o nível tóxico ou excessivo da concentração de um elemento essencial é tão importante quanto identificar seu nível deficiente (MILLS; JONES JR, 1996).

Para verificar o comportamento da soja cultivar CD-208 ao excesso de cinco macronutrientes em solução nutritiva, foi realizado um experimento em casa de vegetação onde foram analisados a acumulação e partição da fitomassa e a concentração de onze nutrientes essenciais nas folhas diagnósticas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Diagnose nutricional

A análise de tecidos vegetais foi desenvolvida para prover informações sobre o estado nutricional das plantas, como forma de direcionar o manejo nutricional para produções ótimas (SMITH; LONERAGAN, 1997).

A folha, na maioria dos casos, é o órgão da planta onde ocorrem as alterações fisiológicas devido a distúrbios nutricionais. Em função disto, quase sempre o diagnóstico nutricional das plantas é feito pela técnica que, de forma ampla, se denomina diagnose foliar (BATAGLIA; DECHEN; SANTOS, 1996).

Supondo existir um valor ótimo para a concentração foliar de um nutriente, podem ser estabelecidos padrões de interpretação da análise química, para uma determinada cultura e com a padronização da amostragem (MUNSON; NELSON, 1973)

Na Tabela 1 encontram-se os padrões nutricionais sugeridos pela EMBRAPA (2004) para a cultura da soja nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.

Tabela 1 - Concentração de elementos usada para a interpretação de análises de tecido de folhas¹ de soja

Elemento	Baixo	Suficiente	Alto
----- (g kg ⁻¹) -----			
N	< 34,7	34,7 - 45,2	> 45,2
P	< 2,4	2,4 - 3,7	> 3,7
K	< 17,6	17,6 - 26,3	> 26,3
Ca	< 7,5	7,5 - 13,1	> 13,1
Mg	< 2,9	2,9 - 4,5	> 4,5
S	< 2,0	2,0 - 3,1	> 3,1
----- (mg kg ⁻¹) -----			
Mn	< 31	31 - 71	> 71
Fe	< 58	58 - 114	> 114
B	< 33	33 - 50	> 50
Cu	< 5	5 - 11	> 11
Zn	< 33	33 - 68	> 68

¹ Terceiro e/ou quarto trifólio com pecíolo.

Fonte: EMBRAPA (2004)

2.2 Balanço nutricional

Há muitos fatores que afetam direta ou indiretamente a concentração dos nutrientes nas plantas, que é em última análise, a resultante da atuação desses fatores (BATAGLIA; DECHEN; SANTOS, 1996).

A concentração de íons no exterior da raiz afeta significativamente a absorção iônica. A presença de altas concentrações de íons no solo pode induzir, na planta, uma absorção de elementos muito acima das necessidades que a planta tem para produzir rendimentos máximos (consumo de luxo) ou uma toxicidade prejudicial ao crescimento da planta. (CASTRO; KLUGE; PERES, 2005).

As interações entre diferentes íons podem afetar sua absorção pelas raízes. Os cátions são absorvidos com maior facilidade quando estão acompanhados de ânions de fácil absorção. O Ca^{2+} é absorvido com maior facilidade a partir do CaCl_2 que do CaSO_4 ou CaCO_3 . Os cátions alcalinos concorrem entre si pelos sítios dos transportadores de cátions. Quando as concentrações desses cátions são similares, o Ca^{2+} é absorvido com maior facilidade, seguido do Mg^{2+} , K^+ e do Na^+ . A absorção de ânions que aceleram o metabolismo celular (NO_3^- , H_2PO_4^- e SO_4^{2-}) provoca um aumento geral da absorção de elementos essenciais (CASTRO; KLUGE; PERES, 2005).

Ventura (1987), trabalhou com plantas de soja variedade Paraná, em vasos com quartzo moído e solução nutritiva contendo 3; 6 e 9 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ de K^+ ; 5; 10 e 15 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ de Ca^{+2} e 2; 4 e 6 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ de Mg^{+2} em combinação fatorial. Seus resultados não indicaram efeito significativo das concentrações dos três cátions na solução sobre o crescimento das plantas. Entretanto, o balanço nutricional foi afetado, mostrando a relação negativa que existe entre os cátions. Na condição de elevada concentração de K na solução, os teores foliares de Ca e Mg, P, Mn e Zn diminuíram. Com o fornecimento mais elevado de Ca, os teores foliares de Mg e Mn reduziram. Nos tratamentos com concentrações mais altas de Mg na solução, ele verificou a diminuição nos teores foliares de Fe e Mn.

Dal Bó et al. (1989) observaram que em vinhedos no estado de Santa Catarina um problema nutricional comum era a inibição da absorção de potássio por magnésio, mesmo havendo consideráveis quantidades de potássio disponível no solo. E a concentração de magnésio nos tecidos foi explicada melhor pela relação Ca/Mg no solo

que pela própria disponibilidade de magnésio no solo, resultado que evidencia a importância do equilíbrio entre estes nutrientes.

2.3 Nutrientes estudados

2.3.1 Fósforo

O fósforo é absorvido pelas plantas nas formas iônicas H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} sendo a primeira a preferencial (Marschner, 1995). A absorção se dá de forma ativa, com gasto de energia e contra o gradiente de concentração. É um elemento onipresente no metabolismo da planta, que, diferentemente do nitrogênio e do enxofre, não sofre troca de valência no desempenho de suas funções bioquímicas no vegetal (Epstein e Bloom, 2005).

A estrutura trivalente do íon fosfato confere a capacidade de realizar duas ligações estáveis e ainda ser ionizado tornando-no insubstituível nas mais essenciais funções biológicas celulares. Sua importância para o surgimento e evolução da vida precede até mesmo a do nitrogênio protéico (Westheimer, 1987).

O fosfato é um componente integral do material genético (DNA e RNA), dos principais compostos energéticos bioquímicos (ATP, creatina-fosfato e fosfoenolpiruvato), dos compostos intermediários de síntese e de degradação, bem como dos fosfolipídios que compõem as membranas celulares (Bloom, 2004; Westheimer, 1987).

Como a concentração de P disponível nos solos normalmente é baixa, as plantas necessitam de mecanismos de absorção bastante eficientes. (ARAÚJO; MACHADO, 2006). Em solos com baixa disponibilidade de fósforo, algumas espécies podem consumir mais de 20% do produto líquido da fotossíntese em mecanismos que aumentem a absorção deste elemento (Marschner, 1995).

A concentração de fósforo usualmente encontrada nas plantas cultivadas situa-se na faixa entre 1,5 a 5 g kg^{-1} da matéria seca, e concentrações maiores que 10 g kg^{-1} geralmente são tóxicas (Epstein; Bloom, 2005; Marschner, 1995). Entretanto, leguminosas tropicais podem sofrer toxidez, mesmo com concentrações mais baixas em seus tecidos (Marschner, 1995).

Howell (1954) classificou a variedade de soja Chief como tolerante a altas concentrações de fósforo na solução nutritiva, pois responde favoravelmente a concentrações de até $3,62 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$. A variedade Lincoln foi classificada como sensível, pois tem o desenvolvimento prejudicado em concentrações mais altas que $1,61 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de P.

As mesmas variedades foram usadas em outro experimento (Foote; Howell, 1964) quando foram enxertadas reciprocamente e ficou demonstrado que a absorção de P a níveis tóxicos e conseqüentemente o desenvolvimento dos sintomas são controlados pelo genótipo do sistema radicular.

No experimento de Green e Warder (1973), plântulas de trigo transplantadas para solução nutritiva com omissão de P apresentaram sintomas de toxidez quando o P foi repostado. Mesmo recebendo P inicialmente, com a supressão temporária de P, as plantas apresentaram danos com o restabelecimento do fornecimento do nutriente. A dose utilizada na solução completa foi $1 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de P e o sintoma observado foi o murchamento das pontas das folhas, onde o fósforo acumulou-se com maior intensidade.

Segundo Borkert et al. (1994), altos teores de fósforo no solo podem induzir à deficiência de zinco desde que esses altos teores estejam associados com reduzidas absorção e translocação de Zn, Fe e Cu.

Teng e Timmer (1990) observaram a redução no crescimento de mudas florestais de *Populus sp.* com a aplicação de altas doses de P na forma de superfosfato triplo. Os clones mais sensíveis tiveram redução de crescimento de até 47% com a aplicação de fósforo equivalente a 1152 kg ha^{-1} . Eles observaram a redução na concentração foliar de Cu e Zn nas plantas e o desenvolvimento de sintomas característicos, sem, no entanto, ocorrer redução da disponibilidade destes nutrientes no solo. Em um estudo subsequente (TIMMER; TENG, 1990), os autores observaram o restabelecimento das plantas em resposta à aplicação de Cu e Zn com as doses elevadas de P, mas sem a eliminação completa dos sintomas foliares apresentados.

Spratt e Smid (1978) cultivaram linhaça (*Linum usitatissimum*) em solos calcáreos que receberam diferentes intensidades de adubação fosfatada e verificaram

que Zn e Cu apresentaram-se deficientes nas folhas das plantas que cresceram nos solos com os mais altos teores de P residual.

Wallace; Mueller e Alexander (1978) examinaram o efeito do fósforo em cinco cultivares diferentes de soja. Na mais alta concentração de fósforo na solução nutritiva, empregada por eles ($4 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$), o conteúdo foliar de fósforo variou entre 6 e $10,1 \text{ mg kg}^{-1}$, conforme a variedade. A concentração foliar de cobre (média das cinco variedades) foi reduzida com o aumento da oferta de fósforo à planta de 6,6 a $4,2 \text{ mg kg}^{-1}$. A concentração foliar de zinco observada (97 mg kg^{-1}) foi muito elevada com o menor suprimento de fósforo ($0,02 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$), quando as plantas podiam ser consideradas deficientes em fósforo. Esta concentração foliar de zinco foi reduzida para 26 mg kg^{-1} com a maior concentração de fosfato na solução nutritiva.

2.3.2 Potássio

O potássio é absorvido na forma iônica (K^+) e assim permanece nas plantas, não formando compostos. É um nutriente muito móvel na planta. O potássio mantém o potencial osmótico e participa do processo de abertura e fechamento dos estômatos, regulando a transpiração e entrada do CO_2 e influenciando a fotossíntese. O potássio também é ativador de um grande número de enzimas, e atua no transporte transmembrana (EPSTEIN; BLOOM, 2005).

É absorvido em processo essencialmente ativo, embora o movimento através de canais tenha sido demonstrado. A absorção atinge seu máximo na presença de Ca^{+2} no meio, embora o excesso tenha efeito inibidor, como acontece, por exemplo, quando se usa um excesso de calcário na neutralização da acidez (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Segundo Bergmann (1992), as plantas podem tolerar relativamente altas concentrações de potássio sem apresentar distúrbios. Entretanto, ele pode causar efeitos indiretos pela deficiência induzida de outros nutrientes, como cálcio e magnésio. Altas concentrações de potássio podem, também, inibir a absorção de boro, zinco, manganês e amônio, induzindo, ou ao menos contribuindo para a deficiência destes elementos.

Keogh, Sabbe e Caviness (1972) compararam as concentrações foliares de nutrientes de dez variedades de grupos de maturação diferentes, cultivadas sob dois níveis de fertilidade do solo. Os autores obtiveram concentrações foliares de potássio mais elevadas na variedade mais produtiva testada ($22,0 \text{ g kg}^{-1}$), que na menos produtiva ($16,3 \text{ g kg}^{-1}$). Em todas as 10 variedades a melhor fertilidade do solo provocou maiores concentrações foliares de potássio, evidenciando que a concentração foliar reflete a disponibilidade do elemento no solo.

Em um estudo realizado em Kentucky, Grove et al. (1987), observaram a resposta de vários cultivares de soja ao potássio em três solos diferentes. Os autores obtiveram uma curva quadrática relacionando a concentração foliar de K e a produção de grãos, com ponto de máxima em $23,5 \text{ g kg}^{-1}$. A concentração para produtividade relativa de 95% da máxima foi estimada em $19,5 \text{ g kg}^{-1}$, mas analisando os dados de cada variedade individualmente, eles obtiveram valores entre $17,5$ e $24,6 \text{ g kg}^{-1}$ de K.

Yin e Vin (2004) estimaram em $24,3 \text{ g kg}^{-1}$ a concentração crítica de K foliar para máxima produtividade de grãos na soja em Ontário, Canadá sob sistema de plantio direto. Os valores críticos de potássio foliar para máxima concentração de K, óleo e isoflavona nas sementes foram, respectivamente, $23,3$; $24,1$ e $23,5 \text{ g kg}^{-1}$.

O potássio, em alta concentração, tem ação antagonística sobre a absorção de Ca^{+2} e Mg^{+2} (FAGERIA, 2001). O autor afirma que a diminuição da absorção de cálcio pelo potássio deve-se à competição decorrente de propriedades fisiológicas destes cátions. Já a influência do potássio sobre a absorção de magnésio advém da competição por compostos ligantes do metabolismo do vegetal.

Fonseca e Meurer (1997) mediram a cinética de absorção de magnésio por plântulas de milho. Obtiveram inibição da absorção do magnésio por cloreto de potássio na concentração de $0,3 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ apenas quando a concentração de magnésio foi inferior a $0,72 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$.

Leggett e Gilbert (1969) observaram que a permanência das raízes destacadas da soja cultivar Hawkeye em solução nutritiva contendo $2 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de Ca^{+2} , $5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de K^{+} e $5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de Mg^{+2} resultou em alteração rápida nas concentrações dos três cátions nas raízes. Apenas o potássio, entretanto, teve variação

significativa após a primeira hora, acumulando mais de $40 \mu\text{mol g}^{-1}$ na massa fresca em 20 horas, enquanto cálcio e magnésio permaneceram estáveis após a primeira hora.

Heenan e Campbell (1981) obtiveram a redução da absorção de manganês pela soja cultivar Bragg quando a concentração de potássio na solução foi alterada de 1 para $10 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$. Este efeito reduziu os sintomas de toxidez de manganês. Ainda, foram observadas concentrações foliares altas de magnésio sob baixo fornecimento de potássio, apenas com o manganês da solução também estando deficiente.

2.3.3 Cálcio

O cálcio é absorvido como Ca^{+2} , e é um importante componente da parede celular, sendo imprescindível para o crescimento apical, tanto das raízes como da parte aérea. É um elemento imóvel quanto à redistribuição na planta.

A deficiência de cálcio é caracterizada pela redução de crescimento do tecido meristemático no caule, na folha e na ponta da raiz. A deficiência normalmente aparece primeiro nas folhas novas e nos pontos de crescimento (meristema apical), provavelmente como consequência da imobilidade do cálcio na planta. A emergência das folhas primárias da soja deficiente em cálcio é retardada e quando as folhas emergem, elas já crescem deformadas (folhas encarquilhadas). Os botões terminais das folhas primárias tornam-se necróticos, faixas cloróticas estreitas desenvolvem-se em volta das porções das folhas remanescentes e o tecido entre as nervuras tende a enrugar. Os botões terminais deterioram e ocorre o colapso dos pecíolos. As folhas primárias tornam-se moles e flexíveis e caem da planta (BORKERT et al., 1994).

Normalmente, o suprimento de cálcio às plantas se dá pela calagem. Em condições onde a calagem não pode ser muito intensa, uma fonte barata de cálcio é o gesso agrícola.

Segundo Bergmann (1992), prejuízos provocados por excesso do íon cálcio são praticamente desconhecidos. Caso sejam aplicados sais de cálcio de forma exagerada, normalmente ocorrem prejuízos pelo excesso de Cl^- ou SO_4^{-2} do sal, os quais causam muito mais prejuízos que o Ca^{+2} .

Garcia et al. (1999) estudaram a influência de várias relações Ca/K na solução nutritiva para o crescimento de videiras (*Vitis vinifera* L.) da cultivar Négrette. Os teores

foliares de cálcio e potássio foram alterados com a mudança da proporção entre os nutrientes na solução, mas o teor de magnésio apenas aumentou, com a concentração mais baixa de potássio na solução. O aumento da concentração de cálcio, mantendo constante a concentração de potássio, diminuiu o teor foliar de potássio e aumentou o de cálcio, mas não interferiu com o magnésio.

Quaggio, Dechen e Raji (1982) conduziram um experimento com amendoim em um Latossolo por três anos e não obtiveram aumento significativo na concentração foliar de cálcio em amendoim mesmo com doses de 6 t ha^{-1} de calcário somada a 2 t ha^{-1} de gesso agrícola, o que triplicou o teor de cálcio trocável do solo.

Quaggio, Mascarenhas e Bataglia (1982) conseguiram o aumento de 7,9 a $8,9 \text{ g kg}^{-1}$ de cálcio nas folhas da soja, aplicando 12 t ha^{-1} de calcário dolomítico ao solo. O cálcio trocável no solo variou de 0,5 a $2,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ neste experimento.

No experimento de Leggett e Gilbert (1969), a variação da concentração de cálcio na solução nutritiva em que estavam embebidas raízes excisadas de soja cultivar Hawkeye entre 1 e $10 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ não interferiu significativamente com a absorção de Ca, Mg, K e Cl.

Lingle; Tiffin e Brown (1963) observaram que concentrações de cálcio maiores que $10 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ foram capazes de reduzir a absorção de ferro quelatizado com EDDHA pelas raízes da soja Hawkeye crescidas em solução nutritiva sem ferro.

Freire (1978), aplicou em vasos com solo pobre em fósforo o equivalente a 200 e 400 kg ha^{-1} de P_2O_5 como superfosfato triplo e obteve a concentração de cálcio nas folhas novas de soja cultivar Paraná de $8,1 \text{ g kg}^{-1}$. Sem aplicação do fertilizante, a concentração foliar de cálcio foi de $9,3 \text{ g kg}^{-1}$. O esperado seria o inverso, considerando-se o aumento no suprimento de cálcio na adubação, pois com o adubo fosfatado utilizados foram adicionados o equivalente a 68,3 e $136,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de cálcio. Ele atribuiu esse efeito à concentração do nutriente nos tecidos, visto que as plantas que não receberam fósforo da adubação tiveram o desenvolvimento vegetativo muito inferior ao daquelas que receberam o nutriente.

Keogh, Sabbe e Caviness (1972) obtiveram concentrações foliares de cálcio entre 7,6 e $10,8 \text{ g kg}^{-1}$ entre dez cultivares testadas. Os maiores teores foliares de cálcio foram apresentados pelas variedades mais produtivas.

2.3.4 Magnésio

O magnésio é absorvido pelas plantas como cátion divalente (Mg^{2+}). É o elemento central da molécula de clorofila e ativador enzimático. É móvel quanto à redistribuição na planta. O magnésio é outro nutriente presente no calcário, quando este for dolomítico, mas pode ser fornecido às plantas como sulfato de magnésio. De acordo com Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), quando sua ocorrência no solo for baixa, sua absorção poderá ser inibida competitivamente pelo potássio.

A deficiência de magnésio causa inicialmente uma cor verde-pálido nas bordas, passando após para clorose marginal nas folhas mais velhas, e com o decorrer do tempo a clorose avança para dentro, entre as nervuras. O amarelecimento começa pelas folhas basais e, com o aumento dos sintomas de deficiência, as folhas jovens também são atingidas (BORKERT et al., 1994).

Altas concentrações de Mg^{+2} no solo e nas plantas podem causar danos por causa do distúrbio causado ao balanço entre cálcio e magnésio. Os prejuízos afetam particularmente as raízes, que são muito sensíveis à deficiência de cálcio (BERGMANN, 1992).

Fageria (2001) relata a influência do magnésio reduzindo a absorção de potássio e cálcio por raízes destacadas de arroz. Segundo ele, este efeito resulta da competição por compostos ligantes do metabolismo do vegetal.

Rosolem et al. (1992), em um experimento em vasos, aplicaram magnésio ao solo em doses entre 0 e $180 \mu g dm^{-3}$ de MgO e observaram o aumento da concentração foliar de magnésio nas folhas da soja de 3,4 para $4,3 g kg^{-1}$ na cultivar IAC-8 e de 3,5 para $5,7 g kg^{-1}$ na cultivar Cristalina.

Quaggio; Mascarenhas e Bataglia (1982) observaram a elevação da concentração foliar de magnésio na soja cultivar IAC-8 de 2,3 para $4,3 g kg^{-1}$ quando o teor de Mg trocável do solo aumentou de 0,2 para $1,8 meq 100 cm^{-1}$, seguindo a aplicação de calcário dolomítico em doses entre 0 e $12 t ha^{-1}$.

Moreira et al. (2003) mediram o efeito do magnésio na absorção de manganês e zinco por raízes destacadas de soja. Eles estudaram cinco concentrações diferentes de zinco e de manganês e a redução na absorção dos micronutrientes pelo magnésio

foi semelhante para todas as concentrações dos micronutrientes. Alterando a concentração de magnésio na solução nutritiva de 1 para 6 mmol_c L⁻¹, os autores obtiveram redução de 64% na absorção do manganês e 68% de redução na absorção do zinco, presentes na solução em concentrações semelhantes às deste experimento.

Leggett e Gilbert (1969) verificaram grande incremento de Mg e decréscimo na absorção de K e Ca por raízes destacadas de soja cultivar Hawkeye, quando a concentração na solução em que estavam embebidas passou de 0,1 para 2 mmol_c L⁻¹ de Mg⁺². Variando a concentração de magnésio na solução entre valores mais elevados, até 10 mmol_c L⁻¹, as concentrações dos três cátions tornaram-se estáveis nas raízes.

Lingle; Tiffin e Brown (1963) obtiveram diminuição da absorção de Fe-EDDHA com concentrações de magnésio na solução nutritiva maiores que de 5 mmol_c L⁻¹ pelas raízes da soja Hawkeye deficientes em ferro.

2.3.5 Enxofre

O enxofre é absorvido da solução do solo pela planta principalmente na forma de sulfato (SO₄⁻²). Ele é incorporado às proteínas, em processo semelhante ao do nitrogênio, entretanto, não é tão móvel quanto à redistribuição na planta quanto o nitrogênio (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

A toxicidade de enxofre tem sido observada em algumas espécies de plantas localizadas especialmente nas proximidades de áreas com muitas indústrias, nas quais há altos níveis de SO₂ na atmosfera. É muito baixa a probabilidade de que isto ocorra nas áreas cultivadas com soja no Brasil (BORKERT et al., 1994).

Segundo Bergmann (1992), relatos de excesso de sulfatos no solo são raros e os danos causados às plantas em solos alcalinos e salinizados com alto conteúdo de sulfatos deve-se principalmente ao efeito salino.

Smith e Loneragan (1997) discorrem que por mecanismo auto-regulatório, as plantas têm a capacidade de restringir a absorção de um íon que esteja em condição de suprimento suficiente ou excessiva e incrementar a absorção do íon do qual estejam deficientes. Segundo eles, este mecanismo de modulação é muito mais efetivo para o sulfato que para o fosfato.

Datta et al. (1995) compararam o efeito da salinidade provocada por sulfato e por cloreto em quatro genótipos diversos de trigo (*Triticum aestivum* cv. chinese spring, *T. monococcum*, *T. turgidum* cv. langdon e *Triticum aestivum* cv. chinese spring x *Thinopyrum bessarabicum*). Foram adicionados à solução nutritiva 90 mmol_c L⁻¹ de sódio acompanhado de cloreto, sulfato, ou combinações de ambos, em soluções de mesma pressão osmótica por 25 dias. O efeito danoso provocado pela salinidade de sulfato foi maior que a provocada pela salinidade de cloreto. Com a alta concentração de sulfato na solução, as plantas acumularam mais sódio, potássio e menos cálcio e magnésio nas folhas e raízes, do que com a alta concentração de cloro na solução.

2.4 Deficiência-induzida de micronutrientes

2.4.1 Cobre

Borkert et al. (1994) afirmam que a deficiência de cobre geralmente causa necrose nas pontas dos folíolos das folhas novas. Essa necrose prossegue pelos bordos dos folíolos, resultando em folhas com aparência de perda de turgidez e de água, que parecem ter secado. O crescimento da soja é retardado e a cor da planta muda para verde-acinzentado, verde-azulado ou cor de oliva.

A alta disponibilidade de fósforo no meio de cultivo tem a capacidade de reduzir a absorção de cobre pelas plantas. O mecanismo desta interação não é bem compreendido, mas acredita-se que não seja devido a reações de precipitação no solo e sim, que seja fisiológico (MURPHY; ELLIS; ADRIANO, 1981).

Bingham e Garber (1960) testaram a aplicação de até 1000 kg ha⁻¹ de P em vários tipos de solo e seu efeito sobre mudas de laranjeira (*Citrus aurantium* L.). Eles observaram deficiências de cobre nessas plantas em todos os tipos de solo, apesar da solubilidade do cobre ter aumentado com a aplicação das fontes de fósforo.

Posteriormente, Bingham (1963) comparou o efeito do fósforo sobre as concentrações de micronutrientes em feijão, milho doce, tomates e mudas de laranjeira. Ele notou que apenas as últimas apresentaram alteração na concentração de Cu e Zn nos tecidos sob a condição de alto P no meio de cultivo (3,2 mmol L⁻¹). Nestas plantas, houve redução na concentração de Cu e incremento na concentração de Zn.

Timmer e Leyden (1980) também verificaram a redução na concentração foliar de cobre em mudas de laranjeira como resposta à aplicação de fósforo. Em seu experimento, mudas micorrizadas tiveram crescimento superior ao das não-micorrizadas, mas o efeito antagônico do fósforo sobre o teor foliar de cobre foi independente da micorrização.

Resultados semelhantes foram obtidos por Locascio, Everett e Fiskell (1968), que testaram doses de P de até 156 kg ha⁻¹ de várias fontes e em dois solos da Flórida cultivados com melancia (*Citrulus lanatus* L.). A aplicação de fósforo só foi efetiva para aumentar a produção, quando acompanhado da aplicação de cobre.

Com soja, Wallace; Mueller e Alexander (1978) examinaram o efeito do fósforo em cinco cultivares diferentes. Notaram a depressão da concentração de cobre nas folhas com o aumento da concentração de fosfato na solução nutritiva.

2.4.2 Ferro

Borkert et al. (1994) descrevem que como no caso da deficiência de Mg, a deficiência de ferro é caracterizada pela diminuição na produção de clorofila pela planta. Porém, inversamente à deficiência de Mg, a deficiência de ferro sempre começa nas folhas novas. No estágio inicial do desenvolvimento dos sintomas, as áreas entre as nervuras dos folíolos das folhas de soja passam a apresentar cor amarelada. À medida que ocorre uma evolução na severidade da deficiência, também as nervuras ficam amarelas e, finalmente, toda a folha fica quase branca. Manchas necróticas de cor marrom podem surgir na margem dos folíolos, próximo às bordas. A deficiência de ferro normalmente ocorre em solos calcários. Latossolos tropicais geralmente têm alta concentração de ferro, todavia, a deficiência pode ocorrer se os solos são calcariados e o pH é elevado, acima de 7,0. Também, altas concentrações de alumínio e manganês na planta podem reduzir a absorção de ferro e induzir à deficiência deste elemento.

2.4.3 Zinco

Segundo Borkert et al. (1994), aplicações muito elevadas de calcário e de fósforo reduzem a disponibilidade de zinco e podem causar deficiência do elemento na soja. Não é claro, entretanto, se a interação reações que ocorrem no solo ou nas plantas (FAGERIA, 2001).

Plantas de soja deficientes em zinco apresentam folhas de cor amarelo-amarronzado-claras, sendo que estes sintomas se agravam nas épocas frias e úmidas e desaparecem quando a temperatura aumenta. No campo, os locais com plantas exibindo sintomas de deficiência de zinco apresentam cor marrom-amarelada quando observados a distância; a maturação é atrasada e há menor número de vagens nas plantas (NELSON; BARBER, 1964).

Ibrikci e Moraghan (1993) plantaram soja da cultivar McCall em vasos com solo, variando o fornecimento de fósforo, zinco e nitrogênio. O sintoma de deficiência de zinco, descrito por eles é de desenvolvimento reduzido das folhas e clorose internerval nas folhas velhas. Estes sintomas foram mais intensos nos tratamentos que receberam fósforo e nitrogênio.

Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) descrevem os sintomas de deficiência de zinco como sendo caracterizado por folhas novas estreitas com manchas grandes cor de ferrugem.

Marschner e Schropp (1977) conduziram um experimento com seis variedades de porta-enxerto de videira em solo deficiente em zinco e em solução nutritiva. No experimento com solo, a concentração foliar de zinco foi reduzida de 26,6 a 15,5 mg kg⁻¹, enquanto a concentração foliar de fósforo não variou com a aplicação de até 2,2 g kg⁻¹ de fósforo ao solo. Nestas condições, as plantas apresentaram redução do crescimento e sintomas de deficiência de zinco. Entretanto, no experimento com solução nutritiva, a concentração foliar de fósforo atingiu até 13,47 g kg⁻¹ com 5 mmol L⁻¹ de fósforo na solução e a concentração foliar de zinco não sofreu alteração significativa, sendo, em média, de 13,8 mg kg⁻¹, menor que no experimento com solo, mas sem que fossem observados sintomas de deficiência de zinco.

Loneragan et al. (1979) realizaram um experimento com trevo subterrâneo (*Trifolium subterraneum* L.) utilizando dois solos com capacidade diferente de adsorção de fósforo, e vários níveis de aplicação de zinco e de fósforo. Pelos resultados obtidos, os autores sugerem que o aumento da toxidez de fósforo sob deficiência de zinco explica a ocorrência de relatos de aumento do requerimento de zinco induzido pela aplicação de fósforo.

Webb e Loneragan (1988), estudando trigo sob deficiência de zinco, observaram redução de 40% na massa seca acumulada pelas plantas, mas apenas 10% de redução no conteúdo de fósforo. Com isso, as plantas acumularam concentrações elevadas de fósforo nas folhas velhas, o que resultou na manifestação combinada dos sintomas de deficiência de zinco e toxidez de fósforo.

Resultado semelhante havia sido observado por Christensen e Jackson (1981) que verificaram sintomas de toxidez de fósforo em batata com deficiência de zinco. Em seu experimento, milho e batata tiveram pouca ou nenhuma redução na absorção de zinco, com o aumento da concentração de fósforo na solução até 3 mmol L⁻¹.

No entanto, também já foi observado o efeito de elevadas concentrações de fósforo nas folhas induzindo a deficiências de Zn, sem a diminuição da concentração total de zinco nas folhas. A redução da disponibilidade fisiológica de zinco nas folhas foi demonstrada por análise química da fração solúvel e análises enzimáticas (CAKMAK; MARSCHNER, 1987).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Instalação do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, em Piracicaba - SP.

Sementes de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) da variedade Coodetec CD 208 foram postas para germinar em rolos de papel Germitest no dia 22/08/2006.

O transplante foi realizado cinco dias depois, quando as plântulas apresentavam radícula bem desenvolvida e cotilédones ainda fechados. A unidade experimental era constituída por 3 plantas com a posterior seleção das duas mais homogêneas em cada

vaso. As plantas foram fixadas à tampa do vaso por uma espuma, à altura do colo, com as raízes imersas na solução dentro do vaso (Figura 1). A solução empregada foi a solução nutritiva nº 2 de Hoagland e Arnon (1950) a 50%, por nove dias, em todos os tratamentos.

Dia 05/09 a solução dos vasos foi substituída, de acordo com o tratamento respectivo, com 50% da concentração indicada na Tabela 3 na primeira semana, e 100% nas demais, renovando-se semanalmente a solução.

Cada vaso de polietileno comportava 3,6 L de solução nutritiva. Os vasos eram pretos na face interna, e pintados externamente na cor alumínio, inclusive a tampa (Figura 3).

Cada vaso recebeu ar comprimido filtrado na vazão de 70 L h^{-1} de ar borbulhado no vaso, durante 20 minutos, 5 vezes por dia.

3.2 Caracterização da variedade

A cultivar de soja CD 208 é recomendada para cultivo no estados do Paraná, São Paulo e no Sul do Mato Grosso do Sul. Classificada como eficiente e responsiva na utilização de adubação, indicada para solos de fertilidade baixa, média ou alta, de maturação semiprecoce (entre 121 e 130 dias) e tolerante à acidez do solo (COODETEC, 2006; EMBRAPA, 2004).

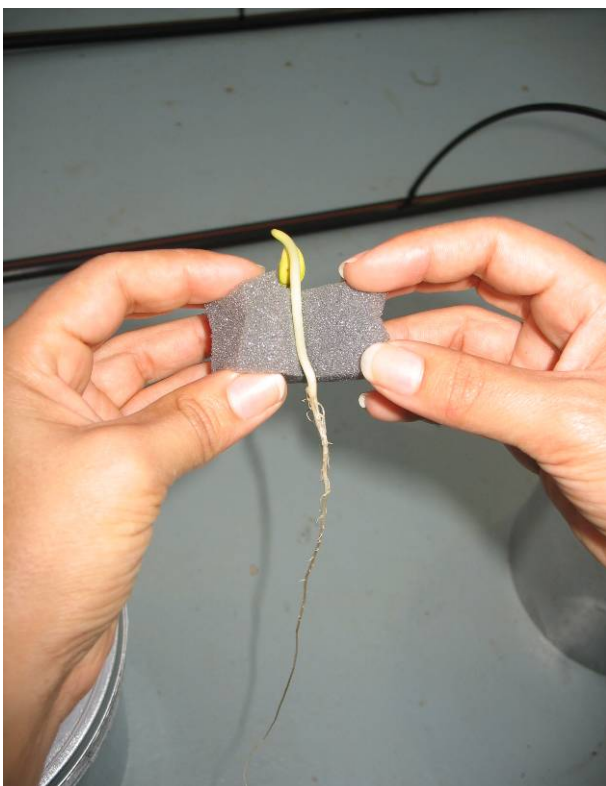


Figura 1 - Detalhe da fixação da plântula à espuma

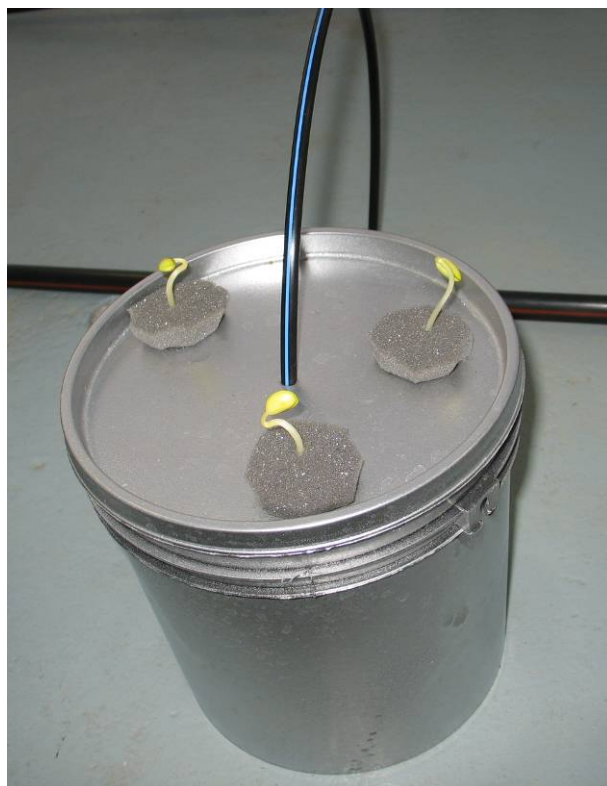


Figura 2 - Vaso após o transplante



Figura 3 - Detalhe do sistema de aeração dos vasos



Figura 4 - Vista do experimento 43 dias após o transplante

3.3 Delineamento experimental

O tratamento aqui considerado como controle recebeu a solução nutritiva nº 2 de Hoagland e Arnon (1950) modificada, com 1 mmol L^{-1} de nitrato substituído por cloreto (Tabela 3).

Os demais tratamentos receberam solução nutritiva igual ao tratamento controle com a adição de 1,5; 3,0; 4,5 e 6,0 $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de um dos dois ânions (H_2PO_4^- , SO_4^{2-}) acompanhado da mesma molaridade de carga de cada um dos três cátions estudados (K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2}), formando, assim, um fatorial mais controle $[(2 \times 3 \times 4) + 1]$ de 25 tratamentos (Tabela 2).

Cada vaso com duas plantas foi considerado uma unidade experimental. O tratamento controle foi replicado 13 vezes, e os demais tratamentos foram replicados 4 vezes, perfazendo um total de 109 vasos em delineamento inteiramente casualizado.

3.4 Composição das soluções nutritivas

A solução dos vasos foi preparada com água destilada e deionizada, pipetando-se as soluções estoques nas quantidades e molaridades descritas na Tabela 3. Todos os sais usados no preparo das soluções estoque eram purificados em grau analítico. A pressão osmótica foi calculada pela equação de Van't Hoff, para temperatura de 25°C .

Tabela 2 - Composição das soluções nutritivas de cada tratamentos

Nutriente em excesso na solução (mmol _c L ⁻¹)	Concentração adicionada à solução nutritiva (mmol _c L ⁻¹)					Pressão osmótica calculada (atm)
	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
Controle	1	4	6	8	4	0,739
P e Ca						
1,5	2,5	4	6	9,5	4	0,794
3,0	4	4	6	11	4	0,850
4,5	5,5	4	6	12,5	4	0,905
6,0	7	4	6	14	4	0,961
P e K						
1,5	2,5	4	7,5	8	4	0,813
3,0	4	4	9	8	4	0,887
4,5	5,5	4	10,5	8	4	0,961
6,0	7	4	12	8	4	1,03
P e Mg						
1,5	2,5	4	6	8	5,5	0,794
3,0	4	4	6	8	7	0,850
4,5	5,5	4	6	8	8,5	0,905
6,0	7	4	6	8	10	0,961
S e Ca						
1,5	1	5,5	6	9,5	4	0,776
3,0	1	7	6	11	4	0,813
4,5	1	8,5	6	12,5	4	0,851
6,0	1	10	6	14	4	0,887
S e K						
1,5	1	5,5	7,5	8	4	0,794
3,0	1	7	9	8	4	0,850
4,5	1	8,5	10,5	8	4	0,905
6,0	1	10	12	8	4	0,961
S e Mg						
1,5	1	5,5	6	8	5,5	0,776
3,0	1	7	6	8	7	0,813
4,5	1	8,5	6	8	8,5	0,905
6,0	1	10	6	8	10	0,887

Tabela 3 - Volumes pipetado (mL L⁻¹) da solução estoque para o preparo de cada solução, de acordo com os tratamentos

Nutriente em excesso na solução (mmol _c L ⁻¹)	Solução estoque											Micro exceto Fe*	Fe – EDTA**
	KH ₂ PO ₄	KNO ₃	Ca(NO ₃) ₂	MgSO ₄	KCl	CaCl ₂	NH ₄ H ₂ PO ₄	Mg(NO ₃) ₂	MgCl ₂	K ₂ SO ₄			
	1 mol L ⁻¹					0,5 mol L ⁻¹							
Controle	-	5,00	4,00	2,00	1,00	-	1,00	-	-	-	1,00	1,00	
P e Ca													
1,5	1,50	3,50	4,75	2,00	1,00	-	1,00	-	-	-	1,00	1,00	
3,0	3,00	2,00	5,50	2,00	1,00	-	1,00	-	-	-	1,00	1,00	
4,5	4,50	0,50	6,25	2,00	1,00	-	1,00	-	-	-	1,00	1,00	
6,0	6,00	-	6,50	2,00	-	0,50	1,00	-	-	-	1,00	1,00	
P e K													
1,5	1,50	5,00	4,00	2,00	1,00	-	1,00	-	-	-	1,00	1,00	
3,0	3,00	5,00	4,00	2,00	1,00	-	1,00	-	-	-	1,00	1,00	
4,5	4,50	5,00	4,00	2,00	1,00	-	1,00	-	-	-	1,00	1,00	
6,0	6,00	5,00	4,00	2,00	1,00	-	1,00	-	-	-	1,00	1,00	
P e Mg													
1,5	1,50	3,50	4,00	2,00	1,00	-	1,00	0,75	-	-	1,00	1,00	
3,0	3,00	2,00	4,00	2,00	1,00	-	1,00	1,50	-	-	1,00	1,00	
4,5	4,50	0,50	4,00	2,00	1,00	-	1,00	2,25	-	-	1,00	1,00	
6,0	6,00	-	4,00	2,00	-	-	1,00	2,50	0,50	-	1,00	1,00	
S e Ca													
1,5	-	3,50	4,75	2,00	1,00	-	1,00	-	-	1,50	1,00	1,00	
3,0	-	2,00	5,50	2,00	1,00	-	1,00	-	-	3,00	1,00	1,00	
4,5	-	0,50	6,25	2,00	1,00	-	1,00	-	-	4,50	1,00	1,00	
6,0	-	-	6,50	2,00	-	0,50	1,00	-	-	6,00	1,00	1,00	
S e K													
1,5	-	5,00	4,00	2,00	1,00	-	1,00	-	-	1,50	1,00	1,00	
3,0	-	5,00	4,00	2,00	1,00	-	1,00	-	-	3,00	1,00	1,00	
4,5	-	5,00	4,00	2,00	1,00	-	1,00	-	-	4,50	1,00	1,00	
6,0	-	5,00	4,00	2,00	1,00	-	1,00	-	-	6,00	1,00	1,00	
S e Mg													
1,5	-	5,00	4,00	2,75	1,00	-	1,00	-	-	-	1,00	1,00	
3,0	-	5,00	4,00	3,50	1,00	-	1,00	-	-	-	1,00	1,00	
4,5	-	5,00	4,00	4,25	1,00	-	1,00	-	-	-	1,00	1,00	
6,0	-	5,00	4,00	5,00	1,00	-	1,00	-	-	-	1,00	1,00	

* A solução estoque de micronutrientes teve a seguinte composição (g L⁻¹): H₃BO₃ = 2,86; MnCl₂.4H₂O = 1,81; ZnCl₂ = 0,10; CuCl₂ = 0,10 e H₂MoO₄.4H₂O = 0,02.

** Preparado com 24,0 g de FeSO₄.7H₂O dissolvido em 286 mL de NaOH 1 mol L⁻¹ com 26,2 g de EDTA dissódico. Agitado por uma noite e completado para 1 L com água desionizada.

3.5 Avaliações

Aos 60 dias após o início do experimento as plantas encontravam-se em floração plena, equivalente ao estágio R2 (FEHR et al., 1971). Foram coletados os terceiros e quartos trifólios com os pecíolos, contados a partir do ápice, considerados como folhas diagnósticas, como a recomendação de EMBRAPA (2004) para os estados de Mato Grosso do Sul e Mato Grosso. Os trifólios coletados das duas plantas de cada vaso foram agrupados compondo uma única amostra e analisados quimicamente conforme Sarruge e Haag (1974).

O material vegetal foi lavado com água destilada, posto para secar em estufa de circulação forçada de ar a 65° C, até massa constante e moído em moinho tipo Wiley. As amostras foram digeridas por via úmida com ácido sulfúrico para a análise de nitrogênio; ácido nítrico e perclórico para determinação de fósforo, enxofre, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco; e via seca em mufla a 600° C para boro.

A concentração de nitrogênio do material foi quantificada por destilação de amônia em destilador semi-micro Kjeldahl seguido de titulação; o fósforo por método colorimétrico com vanadomolibdato de amônio; o enxofre por turbidimetria com cloreto de bário; o boro por colorimetria com azometina-H; cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco por espectrofotometria de absorção atômica e potássio por fotometria de chama.

O restante das plantas foi separado em parte aérea e raízes para cada vaso, e também foi seco e pesado. A massa seca correspondente das folhas diagnósticas foi computada com a massa da parte aérea. Os resultados são expressos por vaso, pela soma do material das duas plantas.

3.6 Análises estatísticas

Os resultados foram analisados quanto à significância estatística da regressão polinomial para as combinações de cátion x ânion, ou para cada cátion e cada ânion. Os coeficientes do modelo de regressão para cada variável independente estudada

foram testados pelo teste t , e a probabilidade da significância estatística indicada em cada caso (5% = *; 1% = **).

O coeficiente de determinação (R^2) das regressões foi calculado considerando a relação entre a soma de quadrados da regressão e a soma de quadrados de tratamentos, separando-se, assim, o erro experimental da falta de ajuste da regressão, conforme preconizam Gomez e Gomez (1984).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Produção e partição da Fitomassa

4.1.1 Produção de massa seca

Nas concentrações estudadas, o fósforo foi o único elemento que causou toxidez às plantas, reduzindo significativamente o crescimento. Não houve interação significativa entre a massa seca acumulada pelas plantas e a força osmótica das soluções. A massa seca total acumulada pelas duas plantas de cada vaso no período do experimento foi estimada pela análise de regressão em 97,95 g por vaso, quando a concentração de fosfato na solução nutritiva foi de 1 mmol_c L⁻¹ e 78,65 g por vaso quando a concentração foi de 7 mmol_c L⁻¹ de P (Figura 5). Este efeito foi independente do cátion adicionado junto com o fosfato.

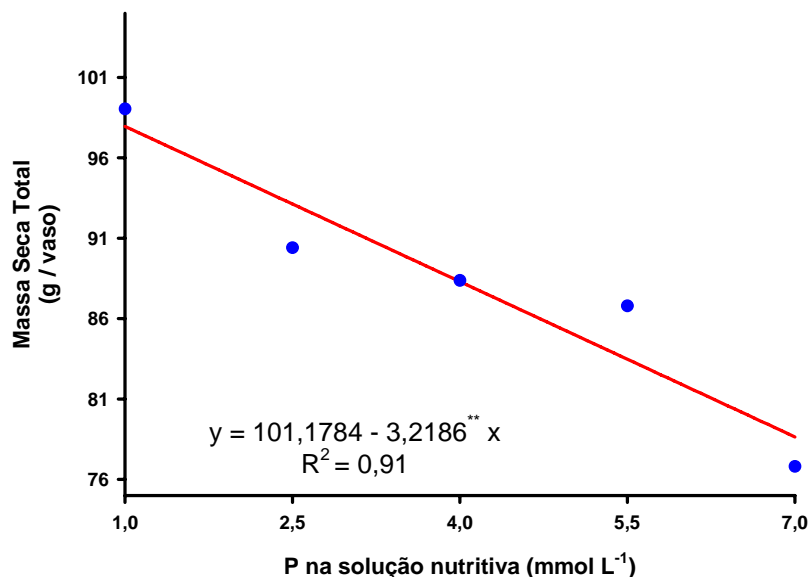


Figura 5 – Produção de Massa Seca Total por vaso (duas plantas) em função da concentração de fosfato na solução nutritiva

Comparando esses resultados ao de Howell (1954), a variedade de soja CD-208 pode ser considerada sensível à toxidez por fósforo, pois sofreu prejuízos ao seu desenvolvimento com concentrações maiores que 1 mmol_c L⁻¹ de fosfato na solução nutritiva. A redução da massa seca produzida pelas plantas desse experimento foi de 20% entre as concentrações de P na solução nutritiva de 1 e 7 mmol_c L⁻¹. No

experimento de Paulsen e Rotimi (1968), a variação na concentração de P na solução nutritiva entre 1 e 7,5 mmol_c L⁻¹ resultou em diminuição de 10% na massa produzida pelas plantas da variedade tolerante Chief e 40% na produzida pela variedade sensível Lincoln.

A regressão para a mesma variável, em função dos tratamentos que incluíam sulfato em excesso na solução, acompanhado dos mesmos cátions, não foi significativa, nem se pode inferir tendência de redução ou aumento de produtividade a esses tratamentos.

4.1.2 Produção de raízes

As plantas que se desenvolveram na solução controle deste experimento produziram o valor médio de 16,71 g de raízes por vaso. A alteração deste valor em função da concentração de P na solução nutritiva pode ser explicada por uma equação quadrática (Figura 6). Esta curva tem ponto mínimo de 14,93 g, observado com a concentração de 4,66 mmol_c L⁻¹ de P.

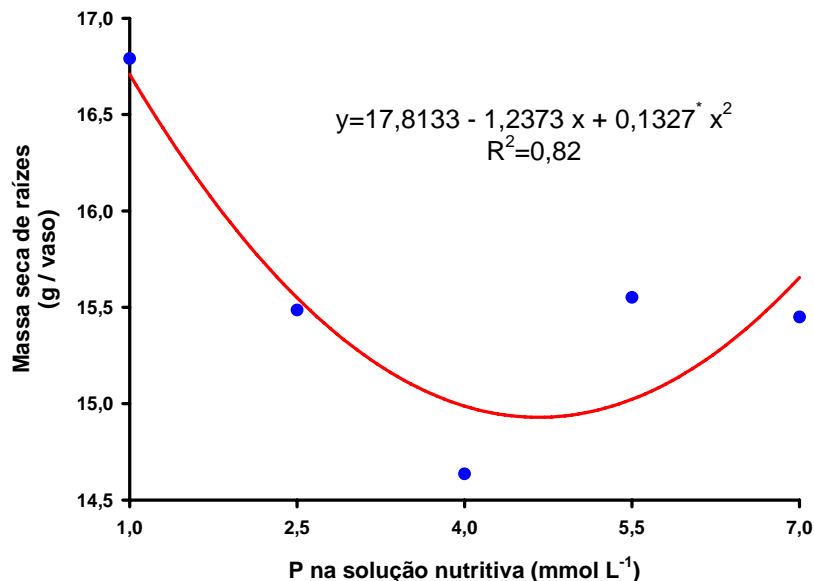


Figura 6 – Produção de massa seca de raízes por vaso (duas plantas) em função da concentração de fosfato na solução nutritiva

4.1.3 Relação Parte-Aérea/Raízes

A redução no crescimento das plantas pelo excesso de fósforo na solução nutritiva não resultou em alteração linear da relação entre a massa seca da parte aérea e a massa seca de raízes das plantas. Como visualizado na Figura 7, a alteração da massa seca das duas partes da planta ocorre de forma distinta. As plantas apresentaram reduções proporcionalmente semelhantes entre as massas da parte aérea e raízes até a concentração estimada em $4,66 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de P na solução nutritiva, a partir da qual foi priorizada a massa de raízes em detrimento da parte aérea.

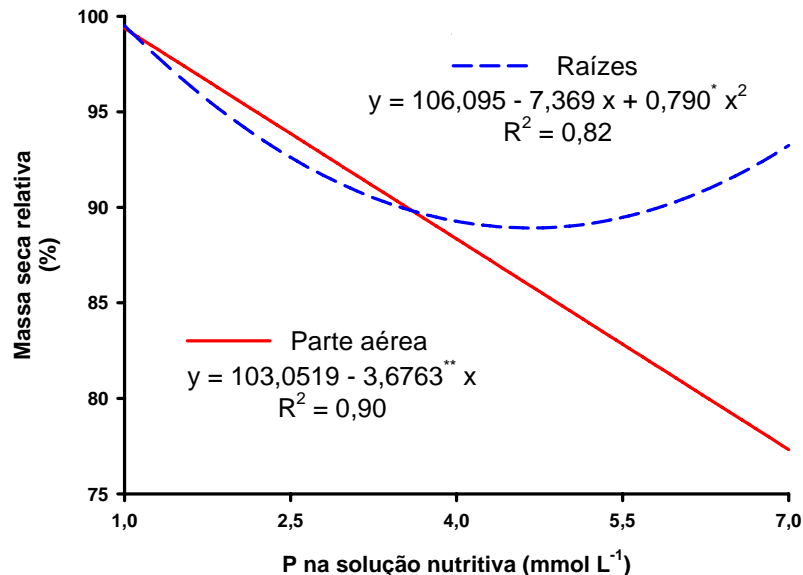


Figura 7 – Massa seca das raízes e da parte aérea relativa ao tratamento controle, em função da concentração de P na solução nutritiva

Assim, a relação entre a massa seca da parte aérea e a de raízes comportou-se de forma não linear, sendo mais intensa a redução acima da concentração de $4,66 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ (Figura 8).

Paulsen e Rotimi (1968) também obtiveram maior redução da massa seca da parte aérea que a de raízes, variando a concentração de P na solução nutritiva entre 1 e $7 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ resultando em diminuição da relação entre massa seca da parte aérea e a de raízes, o que coincide com os resultados obtidos neste experimento. A redução na relação entre estas duas partes da planta foi maior na variedade de soja sensível a toxidez por fósforo Lincoln, que na variedade tolerante Chief.

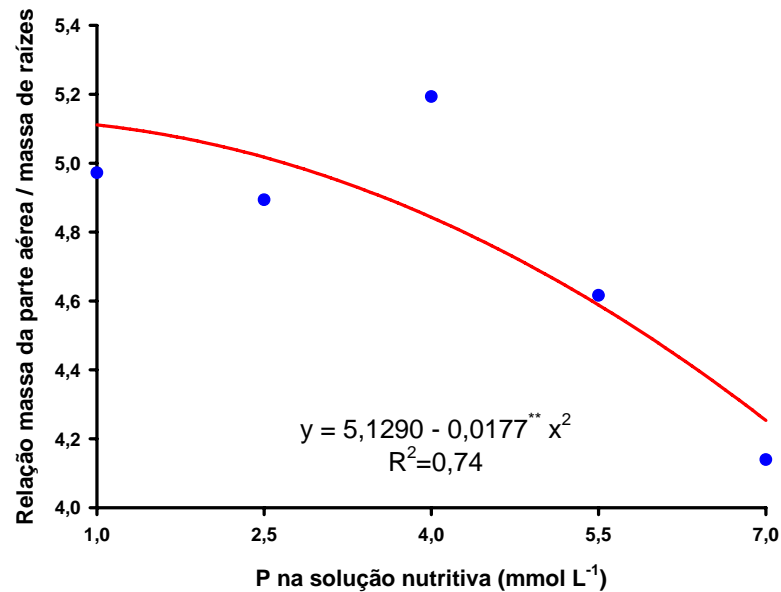


Figura 8 – Relação entre a massa seca da parte aérea e a massa seca de raízes da soja em função da concentração de fósforo na solução nutritiva

Inibição do crescimento da parte aérea, mas continuação ou mesmo aumento do crescimento radicular sob deficiência, pode, principalmente, refletir alterações na alocação de fotoassimilados, mas está, pelo menos em algumas situações, sob controle hormonal direto (MASCHNER, 1995). Segundo Epstein e Bloom (2005), esta resposta das plantas à carência de nutrientes baseia-se no aumento da produção de auxinas pela parte aérea e redução de citocininas pelo sistema radicular, resultando no favorecimento do crescimento radicular em detrimento da parte aérea.

A priorização da alocação de fotoassimilados às raízes nas concentrações de P na solução maiores que 4,66 mmol_c L⁻¹ pode ser devida a um efeito secundário da toxidez de P sobre o balanço hormonal ou resposta à deficiência induzida de outro nutriente. Zinco, um elemento ligado à manutenção da funcionalidade das auxinas, particularmente do ácido indol-acético (MARSCHNER, 1995), tem sua disponibilidade fisiológica diminuída sob oferta excessiva de P às plantas (CAKMAK; MARSCHNER, 1987) e, mesmo sem a observação de redução da sua concentração total nas folhas (discutido no item 4.2.11), pode estar ligado a esse fenômeno. Webb e Loneragan (1988) observaram comportamento semelhante ao discutido aqui, em plântulas de trigo, como resposta à deficiência de zinco.

4.2 Concentração de nutrientes nas folhas diagnósticas

4.2.1 Nitrogênio

O teor de nitrogênio na folha diagnóstico das plantas crescidas na solução controle foi, em média, de $26,53 \text{ g kg}^{-1}$. Este teor de nitrogênio é avaliados como “baixo”, pela classificação de faixas, segundo a recomendação de EMBRAPA (2004), mas está de acordo com ensaios prévios realizados nas mesmas condições. As plantas não apresentavam sintomas de deficiência de nitrogênio, como clorose e senescência das folhas velhas. Pelo contrário, apresentavam grande desenvolvimento vegetativo, folhas grandes e verdes, o que pode ser interpretado como adequada a excessiva nutrição de nitrogênio.

De fato, as plantas na casa de vegetação tem o desenvolvimento favorecido, pois há menor competição por espaço e luz, e os nutrientes são prontamente disponíveis na solução. A oferta de nitrogênio na solução, tanto na forma de nitrato como de amônio, isenta a planta da necessidade de formar nódulos simbióticos com bactérias fixadoras de nitrogênio. O sustento da relação simbiótica demanda a oferta de assimilados energéticos da planta para os nódulos maior do que a consumida na assimilação do nitrato (MARSCHNER, 1995), o que retarda ou diminui o desenvolvimento vegetativo de plantas noduladas em relação àquelas crescendo com suprimento suficiente de nitrogênio mineral, como observado nos experimentos de Israel e Jackson (1982) e Finke, Harper, e Hageman (1982). Por esses motivos, as plantas deste experimento produziram fitomassa superior ao esperado de plantas em campos de cultivo, e a diluição do nitrogênio assimilado explica os relativamente baixos teores foliares e a discrepância com a tabela de interpretação de análise foliar (JARREL; BEVERLY, 1981).

A regressão linear para a concentração de nitrogênio nas folhas diagnósticas da soja foi estatisticamente significativa para os tratamentos em que o fósforo foi acrescentado à solução nutritiva além da concentração recomendada por Hoagland e Arnon (1950) (Figura 9).

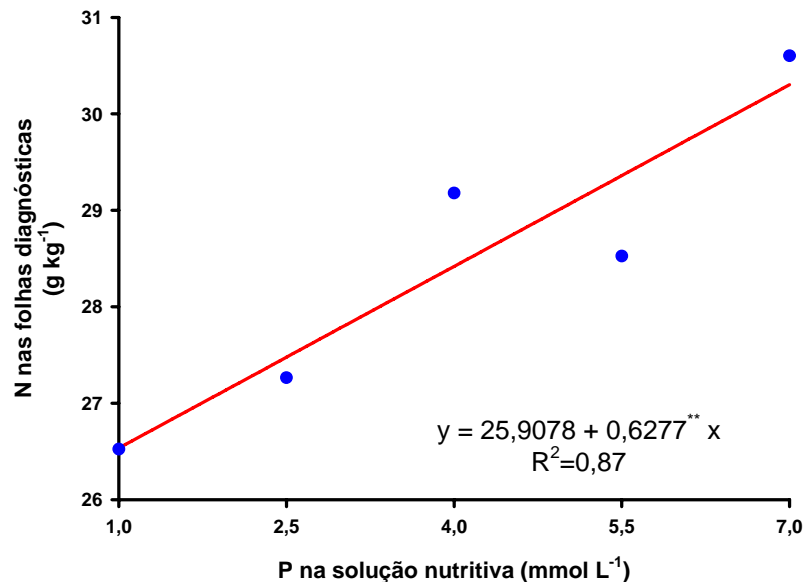


Figura 9 – Concentração de nitrogênio nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de fósforo na solução nutritiva

A justificativa mais plausível para esse efeito é a concentração de nitrogênio nos tecidos com a redução da acumulação de massa seca pelas plantas com as concentrações mais altas de P na solução nutritiva. A uma redução da massa seca de 20% correspondeu um aumento na concentração foliar de nitrogênio de 14%.

A observação de concentrações de nitrogênio maiores nas plantas com pior desenvolvimento também foi feita por Freire (1978). Entretanto, em seu trabalho, o desenvolvimento das plantas foi reduzido por deficiência de fósforo e não por toxidez. Assim, a menor concentração de nitrogênio nas folhas foi obtida com a maior dose de P aplicada, o que é o inverso do obtido neste experimento.

4.2.2 Fósforo

Nas plantas que cresceram na solução nutritiva controle deste experimento, a concentração foliar de P foi de 3,66 g kg⁻¹. Esta concentração é muito próxima da concentração considerada “alta” pela tabela de interpretação de diagnose foliar por faixas de suficiência recomendada por EMBRAPA (2004). Isso indica que o teor de fósforo da solução completa de Hoagland e Arnon (1950) é suficiente para o desenvolvimento de plantas de soja.

A concentração foliar de fósforo aumentou com o aumento da concentração do elemento na solução nutritiva. Essa relação foi explicada por uma equação polinomial inversa de máximo $12,80 \text{ g kg}^{-1}$ (Figura 10). Paulsen e Rotimi (1968) obtiveram concentrações de fósforo nas folhas da variedade sensível a toxidez de fósforo, Lincoln, de $10,8 \text{ g kg}^{-1}$ e de $9,80 \text{ g kg}^{-1}$ nas folhas da variedade tolerante Chief. Seus resultados confirmam o caráter assintótico da curva que descreve a relação entre a concentração de fósforo nas folhas e a concentração deste elemento na solução, assim como resultados de Foote e Howell (1964) também o fazem.

A concentração foliar de fósforo nas plantas crescidas na solução nutritiva padrão foi de $3,66 \text{ g kg}^{-1}$, considerada como “suficiente” segundo o critério de interpretação por faixas de suficiência recomendado por EMBRAPA (2004). Com o aumento da concentração do nutriente na solução, as plantas acumularam quantidades maiores de fósforo nas folhas, com prejuízo à produção. A média observada na concentração foliar de fósforo com $2,5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de P na solução nutritiva foi $7,12 \text{ g kg}^{-1}$, muito acima do valor considerado “alto” por aquela instituição. A produção média de massa seca por vaso observada nas plantas que apresentaram essa concentração foliar de fósforo foi $8,64 \text{ g}$ menor que naquelas cuja nutrição em relação ao nutriente foi classificado como “suficiente”.

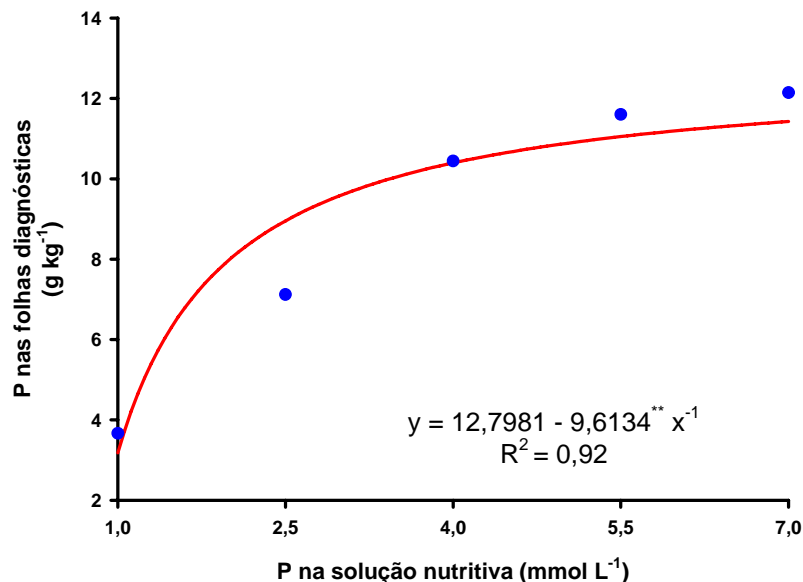


Figura 10 – Concentração de fósforo nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de fósforo na solução nutritiva

Aumentando-se o teor de fósforo da solução nutritiva, obteve-se plantas com concentração foliar de fósforo de até 16,01 g kg⁻¹. Todos os tratamentos com teores de fósforo maior que o da solução testemunha produziram plantas com teor de fósforo “alto”, segundo EMBRAPA (2004). Isto indica que facilmente pode-se obter teores foliares elevados de P em folhas de soja cultivada em solução nutritiva.

Wallace; Mueller e Alexander (1978) obtiveram concentrações foliares médias de fósforo entre 6,0 (cv. Hawkeye) e 10,1 g kg⁻¹ (cv. Waine), analisando cinco variedades de soja com a concentração de fósforo na solução nutritiva de 4 mmol_c L⁻¹. Sob a mesma concentração do elemento na solução nutritiva, neste experimento, as plantas da variedade CD-208 apresentaram concentração foliar média de 10,4 g kg⁻¹.

Fósforo foi o único nutriente ao qual pôde ser atribuído efeito tóxico neste experimento. Ao aumento da concentração de fósforo nas folhas está relacionada a redução da acumulação de massa seca em toda a gama de concentrações observada (Figura 11).

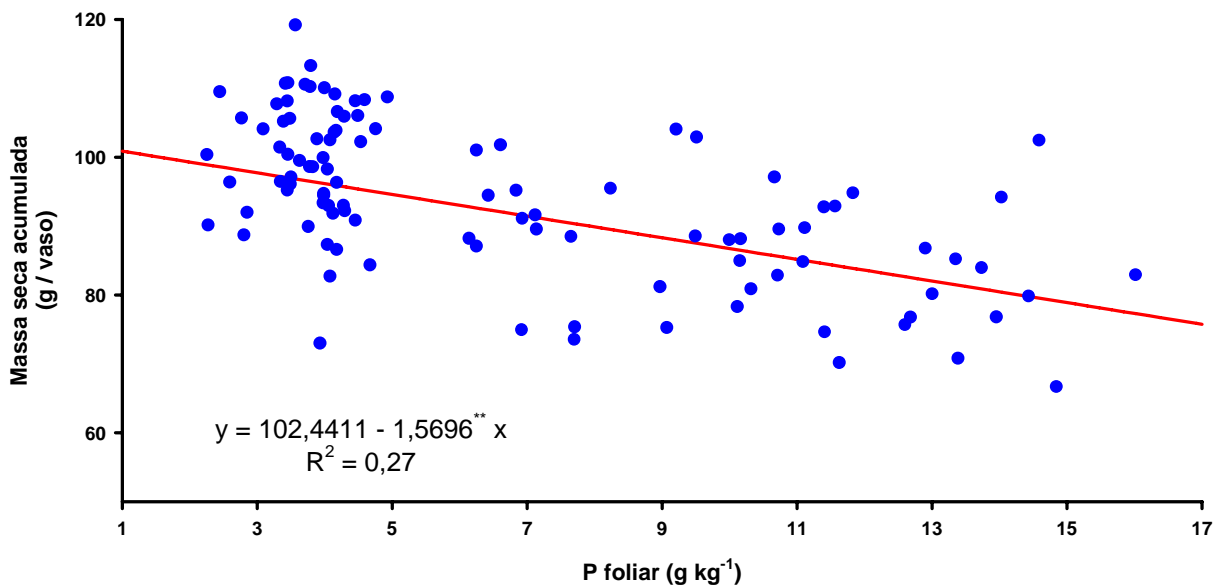


Figura 11 - Produção de massa seca pela soja em função do teor foliar de P

A adaptação das plantas a ambientes com pouca disponibilidade de fósforo explica a pouca habilidade para lidar com concentrações elevadas do nutriente na solução e absorver quantidades tóxicas. Esta característica está relacionada com o desempenho produtivo em campo. Howell e Bernard (1961) classificaram 42 variedades

quanto à sensibilidade à toxidez por fósforo. No grupo classificado como tolerante, a maioria das variedades era considerada já em desuso no final da década de 50. Em compensação, praticamente todas as variedades classificadas nos outros grupos eram importantes comercialmente, ou variedades novas e promissoras.

Pal et al. (1989), estimaram entre 2,75 e 3,30 g kg⁻¹ a concentração foliar ideal de fósforo na folha diagnóstico da soja para produção de grãos na Nigéria. A curva de regressão que os autores obtiveram tem ponto de máxima em 3,4 g kg⁻¹. As concentrações foliares de fósforo do presente experimento situam-se quase totalmente acima desta faixa, onde a função tem natureza decrescente, o que explica os resultados obtidos.

Bell, Hallmark e Dombeck (1995) observaram aumento de produtividade associado a concentrações foliares de P maiores que 3,1 g kg⁻¹ e propõe a classificação como “suficiente” da faixa de concentração entre 3,1 e 5 g kg⁻¹ de P para soja em Arkansas. Os resultados obtidos neste experimento indicam que esta faixa não representa o teor ótimo de P para máxima massa seca no pleno florescimento (R2) de plantas crescendo em solução nutritiva. Nesta situação, a tabela de recomendação de interpretação foliar de EMBRAPA (2004), que sugere a faixa entre 2,4 e 3,7 g kg⁻¹ como “suficiente” ou os valores propostos por Pal et al. (1989) foram mais adequados. Uma possível explicação para este fato pode ser a diferença varietal e a adaptação a diferentes níveis de fertilidade de solo características de cada região.

4.2.3 Potássio

A concentração média de potássio nas folhas diagnósticas da soja crescendo na solução nutritiva padrão foi de 25,23 g kg⁻¹. O teor foliar deste nutriente pode aumentar consideravelmente pelo efeito chamado consumo de luxo, ou “estoque emergencial”, como prefere Epstein e Bloom (2005), em que consideráveis quantidades do cátion são estocadas nos vacúolos celulares quando há disponibilidade à planta. Pelos resultados relatados por Borkert, Silva e Sfredo (1993) e os constantes em EMBRAPA (2004), as concentrações de potássio nestas folhas de soja podem ser consideradas como “altas” e não são esperados incrementos produtivos pela aplicação de potássio ao solo de cultivo ou o aumento da concentração do nutriente à solução nutritiva.

Adicionando-se mais nutrientes à solução nutritiva padrão do experimento, puderam ser observados quatro comportamentos diferentes para o teor de potássio nas folhas diagnósticas da soja:

I. A adição de magnésio até a concentração de $10 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ou cálcio até $14 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$, acompanhados de sulfato à solução nutritiva não alterou significativamente o teor foliar de potássio com a concentração fixa deste em $6 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ (Tabela 4 e 5). Isso endossa a observação de Fonseca e Meurer (1997), que não obtiveram diminuição da cinética de absorção de potássio por plântulas de milho mesmo com concentrações de magnésio de $3 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ e a concentração de potássio dez vezes menor na solução nutritiva. Estes dados também concordam com os obtidos por Ventura (1987), que não observou redução na concentração foliar de potássio com concentrações de cálcio de até $15 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ e de magnésio de até $6 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ na solução nutritiva.

Tabela 4 - Concentrações de potássio nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de cálcio na solução nutritiva com o excesso do elemento em relação à solução controle adicionado acompanhado de sulfato (média de 4 repetições)

Ca^{+2} na solução ($\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$)	K na folha (g kg^{-1})
8,0	25,23
9,5	23,40
11	23,84
12,5	23,78
14	24,54

* K = $6 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$; Mg = $4 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$

Tabela 5 - Concentrações de potássio nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de magnésio na solução nutritiva com o excesso do elemento em relação à solução controle adicionado acompanhado de sulfato (média de 4 repetições)

Mg ⁺² na solução (mmol _c L ⁻¹)	K na folha (g kg ⁻¹)
4,0	25,23
5,5	25,12
7,0	24,04
8,5	23,40
10	24,80

* K = 6 mmol_c L⁻¹; Ca = 8 mmol_c L⁻¹

II. Quando o magnésio ou o cálcio foram adicionados acompanhados de fosfato, houve o aumento na concentração foliar de potássio em 21% (Figura 12). Este efeito pode ser atribuído à concentração do nutriente nos tecidos, já que estes tratamentos com alto fosfato na solução resultaram na acumulação de massa seca pelas plantas inferior em 24% à do tratamento controle (Figura 5).

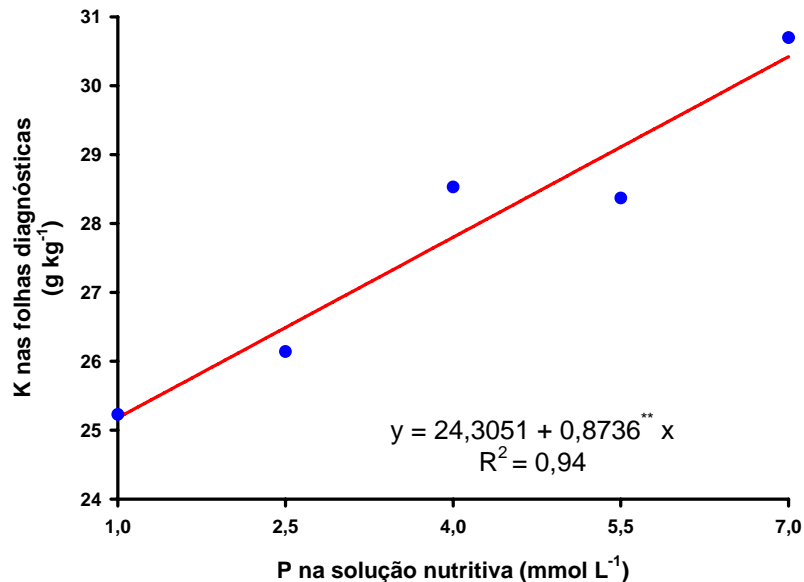


Figura 12 - Concentração de potássio nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de fosfato na solução nutritiva (exceto tratamentos com potássio)

III. Com a adição de potássio à solução nutritiva, acompanhado de sulfato, foi observado o incremento linear na concentração foliar de potássio de 17% (Figura 13). Com a concentração de potássio na solução nutritiva igual a $12 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$, o teor foliar apresentado pelas plantas foi de $29,9 \text{ g kg}^{-1}$, sem mudanças concomitantes no desenvolvimento das plantas, o que caracteriza o consumo de luxo. Essa concentração foliar de potássio é classificada como “alta” por EMBRAPA (2004). As observações de produção de grãos e teor foliar de potássio feitas por Borkert; Silva e Sfredo (1993) ajustaram-se a uma equação quadrática de máximo em $20,2 \text{ g kg}^{-1}$. No presente trabalho, a observação de concentrações foliares de potássio mais altas, sem interferência com o desenvolvimento das plantas, resultantes da adição de potássio acompanhado de sulfato à solução nutritiva não se ajustam ao caráter quadrático daquela curva nem das obtidas por Yin e Vin (2004) ou Grove et al. (1987). Isso demonstra que elas não podem ser aplicadas ao estágio de desenvolvimento aqui estudado ou que as plantas podem exibir concentrações maiores sem prejuízos e que um ajuste melhor deve ser dado por uma curva assintótica quando essas concentrações forem obtidas.

Entretanto, o fato de não terem sido observados aumentos de produção de massa associados aos teores foliares de K mais elevados endossa a classificação proposta por Borkert; Silva e Sfredo (1993) que considera como “suficientes” valores até $25,0 \text{ g kg}^{-1}$ e com EMBRAPA (2004), que considera como “altos” valores acima de $26,3 \text{ g kg}^{-1}$.

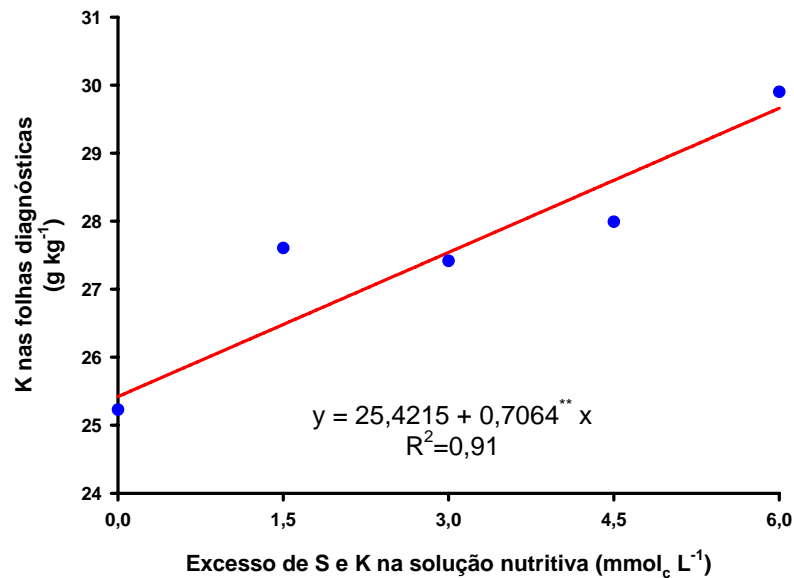


Figura 13 –Concentração de potássio nas folhas diagnósticas da soja em função da intensidade do excesso de sulfato e potássio na solução nutritiva

IV. A adição de potássio acompanhado de fosfato à solução nutritiva resultou na maior concentração foliar de potássio observada no experimento: 36,02 g kg⁻¹. O grande aumento no teor foliar desse nutriente (Figura 14) sugere a ocorrência de interação entre os dois fatores observados anteriormente, o consumo de luxo e a concentração do nutriente nas plantas com menor desenvolvimento. O aumento de 44% na concentração foliar de potássio é numericamente próximo da soma entre os incrementos devidos ao consumo de luxo observado com potássio acompanhado de sulfato e o efeito de concentração observado nos outros tratamentos com fósforo em excesso.

Como conseqüência da diferente influência da toxidez de fósforo sobre os macronutrientes catiônicos, todos os tratamentos contendo fósforo em níveis elevados na solução resultaram na alteração do balanço entre potássio e os outros cátions. Mesmo com a elevação de cálcio e de magnésio na solução acompanhando o fosfato, o balanço foi deslocado no sentido do potássio.

Este resultado é o oposto do obtido por Rienbott e Blevins (1991), que cultivando trigo (*Triticum aestivum* L.) com solução nutritiva, e variando a concentração de H₂PO₄⁻ na solução de 0,025 a 0,4 mmol_c L⁻¹ com renovação diária, observaram a alteração da relação (Ca+Mg)/K de 0,55 a 1,00 na parte aérea. No entanto, dentro da variação da

concentração de fósforo daquele experimento houve resposta positiva do desenvolvimento das plantas, indicando que as plantas encontravam-se deficientes e não foram testados níveis tão altos deste nutriente que causassem-nas dano.

Isso sugere que o efeito não é devido à oferta de fósforo à planta, mas sim à menor ou maior acumulação de massa.

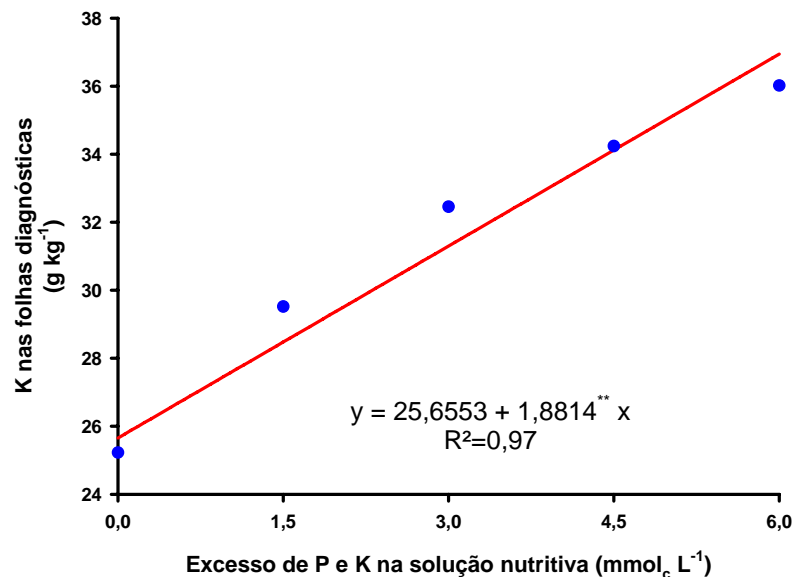


Figura 14 – Concentração de potássio nas folhas diagnósticas da soja em função do excesso de fosfato e potássio na solução nutritiva

Disto se infere que a presença de quantidades suficientes do nutriente na solução nutritiva é condição suficiente para a boa nutrição potássica da planta. O aumento da concentração de cálcio e de magnésio não foi capaz de alterar minimamente a concentração de potássio nas folhas diagnósticas da soja. Nem mesmo o efeito tóxico observado pelas grandes concentrações de fósforo na solução nutritiva resultaram em diminuição significativa da absorção de potássio, nessa condição, a concentração do nutriente nas folhas diagnósticas aumentou, indicando a concentração do elemento por alteração maior da massa das plantas que de sua absorção.

Aumentando-se a concentração de potássio na solução nutritiva, obteve-se incremento na concentração foliar do elemento, o que indica a ocorrência de consumo de luxo. Pôde ser observado, inclusive, o efeito somado dos dois fenômenos:

concentração pela menor acumulação de massa seca sob toxidez de fósforo e consumo de luxo pela maior disponibilidade de potássio na solução.

4.2.4 Cálcio

A concentração de cálcio nas folhas diagnósticas da soja cultivada na solução nutritiva padrão do experimento foi de $7,9 \text{ g kg}^{-1}$, considerada como “suficiente” pela tabela de interpretação recomendada por EMBRAPA (2004).

A presença de até $12 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de potássio na solução nutritiva resultou em uma concentração foliar de $6,9 \text{ g kg}^{-1}$ de cálcio (Figura 15). Redução semelhante foi observada por Ventura (1987). E a concentração de magnésio de $10 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ na solução nutritiva resultou na observação da concentração foliar de $7,0 \text{ g kg}^{-1}$ de cálcio (Figura 16). Em ambos os casos, a concentração foliar de cálcio pode ser considerada “baixa” pela tabela de interpretação de análise foliar, no entanto não foram observados sintomas de deficiência deste nutriente, nem redução da acumulação de massa seca pelas plantas que receberam estes tratamentos, concluindo-se que os valores situam-se dentro da variação suportada pela planta até esta fase do crescimento.

No entanto, a tendência dos resultados indicados pelas análises de regressão permitem estimar que concentrações maiores de magnésio e de potássio na solução nutritiva podem causar a redução da concentração foliar de cálcio a valores menores que os observados neste experimento, o que pode ser responsável por desordens nutricionais em alguns casos.

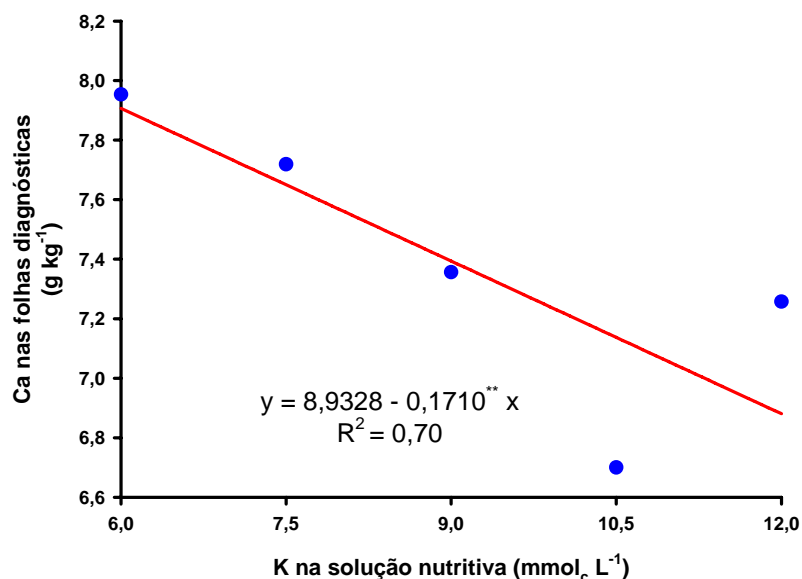


Figura 15 - Concentração de cálcio nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de potássio na solução nutritiva

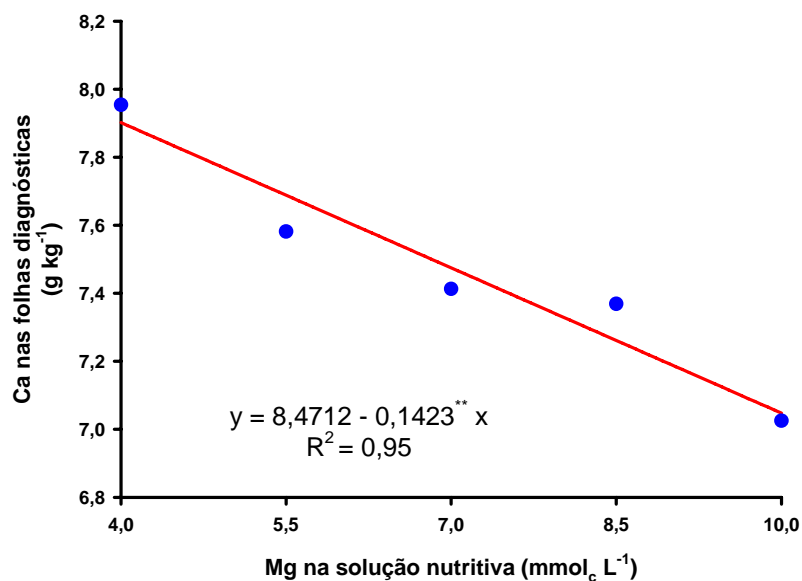


Figura 16 - Concentração de cálcio nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de magnésio na solução nutritiva

O aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva não alterou significativamente a concentração foliar deste elemento, independente do ânion acompanhante, nem foi observado efeito de concentração com a menor acumulação de massa seca das plantas, conseqüentemente não houve diferença quanto ao ânion acompanhando o cálcio, para esse resultado (Tabela 6).

Tabela 6 - Concentrações de cálcio nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de cálcio na solução nutritiva (média de 8 repetições)

Ca ⁺² na solução*	Ca na folha
(mmolc L ⁻¹)	(g kg ⁻¹)
8,0	7,95
9,5	7,96
11	8,32
12,5	7,86
14	8,07

* O excesso em relação à solução controle é acompanhado tanto de fosfato quanto de sulfato. K = 6 mmolc L⁻¹; Mg = 4 mmolc L⁻¹

Cálcio é um nutriente cuja concentração foliar sofre pouca variação com o aumento do fornecimento do nutriente além da necessidade mínima da planta. Quaggio, Dechen e Raij (1982) trabalhando com amendoim; Quaggio, Mascarenhas e Bataglia (1982) e Ventura (1987), com soja e Silveira (2005), com capim-Tanzânia, observaram apenas pequeno incremento nesta variável, acima da concentração crítica às plantas. Em compensação, aumentos grandes da concentração foliar de cálcio podem ser observados quando a disponibilidade de potássio ou magnésio às plantas é limitado, como nos resultados observados por Consolmagno Neto (2006) e Ventura (1987).

4.2.5 Magnésio

A concentração de magnésio nas folhas diagnósticas da soja foi estimada em 3,8 g kg⁻¹ pela análise de regressão. Este valor encontra-se dentro da faixa de suficiência recomendada por EMBRAPA (2004).

O teor de magnésio nas folhas diagnósticas da soja foi influenciado de forma diferenciada pelo ânion adicionado à solução nutritiva. Quando utilizado tanto cálcio como potássio acompanhando de sulfato, a concentração foliar de magnésio não foi alterada, mesmo nas soluções com os desbalanços mais extremos estudados (Tabela 7 e Tabela 8). Este comportamento concorda com o observado por Fonseca e Meurer (1997), já que o magnésio encontrava-se em concentração suficiente na solução nutritiva e também com Leggett e Gilbert (1969) que não observaram redução de

absorção de magnésio pelo efeito da adição de cálcio acompanhado de cloreto à solução nutritiva fora da faixa com limitação deste nutriente.

Tabela 7 - Concentrações de magnésio nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de potássio na solução nutritiva com o excesso do elemento em relação à solução controle adicionado acompanhado de sulfato (média de 4 repetições)

K ⁺ na solução* (mmol _c L ⁻¹)	Mg na folha (g kg ⁻¹)
6,0	3,95
7,5	4,17
9,0	4,10
10,5	3,87
12,0	3,97

* Mg = 4 mmol_c L⁻¹; Ca = 8 mmol_c L⁻¹

Tabela 8 - Concentrações de magnésio nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de cálcio na solução nutritiva com o excesso do elemento em relação à solução controle adicionado acompanhado de sulfato (média de 4 repetições)

Ca ⁺² na solução* (mmol _c L ⁻¹)	Mg na folha (g kg ⁻¹)
8,0	3,95
9,5	3,80
11,0	4,45
12,5	3,65
14,0	4,00

* K = 6 mmol_c L⁻¹; Mg = 4 mmol_c L⁻¹

Em oposição, quando adicionados à solução padrão deste experimento os mesmos cátions potássio e cálcio, acompanhados de fosfato, a redução na concentração foliar de magnésio foi significativa, de 3,9 para 3,0 g kg⁻¹ (Figura 17), sem a observação de diferença significativa quanto ao cátion acompanhando o fosfato.

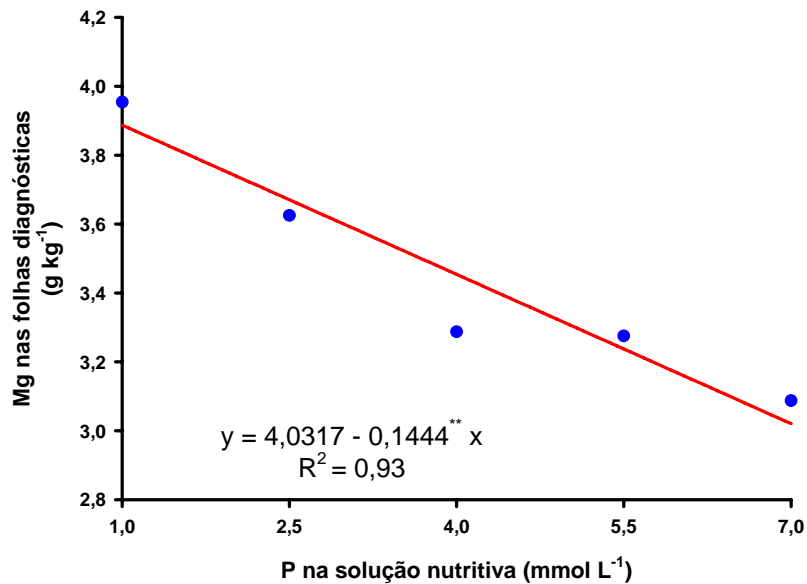


Figura 17 - Concentração de magnésio nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de fósforo na solução nutritiva (exceto tratamentos com magnésio)

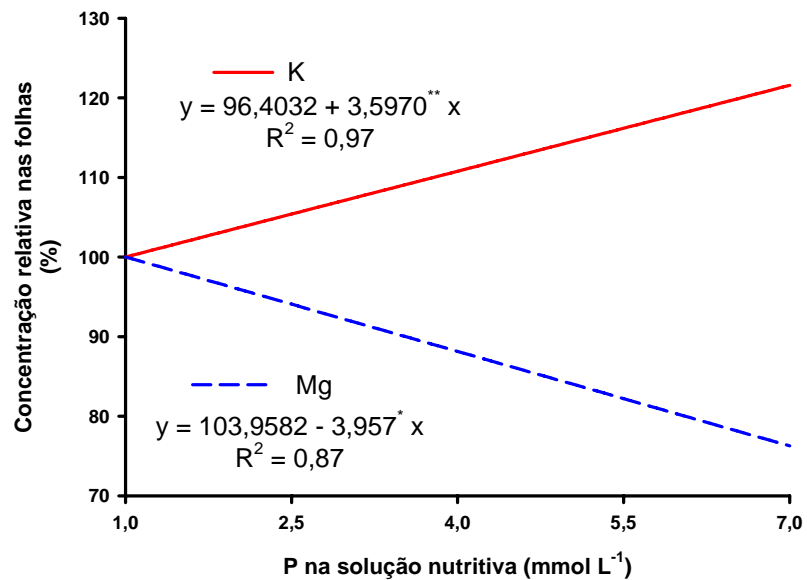


Figura 18- Concentração de potássio e magnésio relativas ao tratamento controle, em função da concentração de fósforo acompanhado de cálcio na solução nutritiva

Não tendo sido observado efeito significativo do excesso de cálcio na solução nutritiva sobre os teores foliares de potássio e magnésio, analisou-se o efeito da adição de fósforo acompanhado de cálcio à solução nutritiva, para se inferir os resultados devidos à toxidez por fósforo, e da respectiva diminuição da acumulação de massa seca pelas plantas, à concentração de potássio e de magnésio nas folhas diagnósticas.

Nos resultados demonstrados na Figura 18 pode ser observado que foram diferentes os efeitos da toxidez de fósforo sobre o teor foliar de potássio e sobre o de magnésio.

Estes tratamentos resultaram em menores acumulações de massa seca pelas plantas e foi observado o efeito de concentração de potássio nos tecidos, enquanto o teor foliar de magnésio foi reduzido, e o de cálcio permaneceu constante. Assim, apesar de a redução do teor de magnésio nas folhas diagnósticas ser proporcionalmente similar ao aumento do teor de potássio, pela diferença de ordem de grandeza entre as duas concentrações, a soma dos cátions nestas folhas aumentou.

Freire (1978), adicionou superfosfato-tríplo ao solo em vasos, fertilizante em que o fosfato acompanha cálcio e também obteve redução da concentração foliar de magnésio. Em seu experimento, entretanto, esse efeito pode ter sido devido à diluição do nutriente com o melhor desenvolvimento das plantas bem supridas em fósforo.

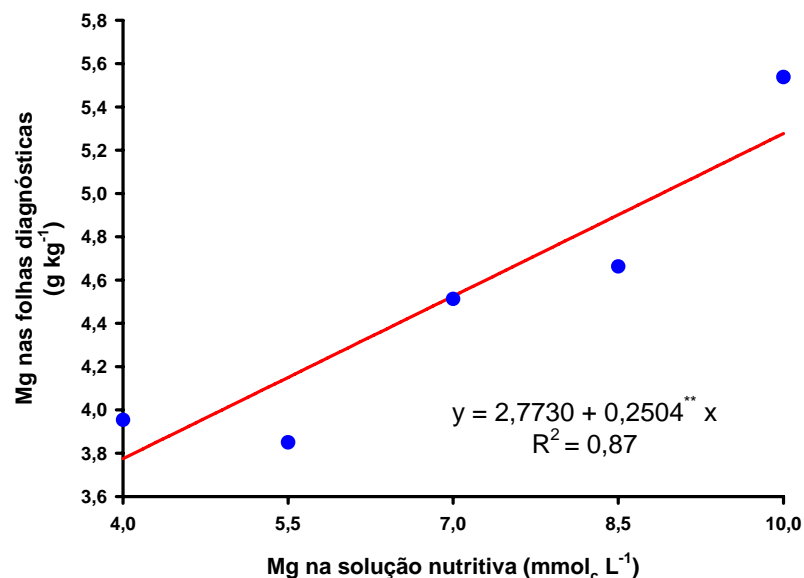


Figura 19 - Concentração de magnésio nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de magnésio na solução nutritiva (tanto acompanhado de fosfato como de sulfato)

Com o aumento da concentração de magnésio na solução nutritiva, foi observado a elevação da concentração foliar deste elemento. O comportamento é consistente para ambos os ânions acompanhantes ao magnésio e não foi observada diferença significativa entre eles (Figura 19). Por esses resultados, é possível inferir que o magnésio não sofreu efeito de concentração na massa seca das plantas com menor desenvolvimento, e apenas sofreu incremento de suas concentrações foliares em

resposta somente ao aumento de sua própria concentração na solução. O aumento da absorção de magnésio e sua expressão no conteúdo mineral das folhas, em resposta ou aumento da oferta no nutriente é comumente observado, e foi relatado também por Quaggio; Mascarenhas e Bataglia (1982); Rosolem et al. (1992); Leggett e Gilbert (1969).

4.2.6 Enxofre

A concentração de enxofre nas folhas diagnósticas da soja cultivada na solução controle foi de $1,78 \text{ g kg}^{-1}$. Este valor também está classificado como “baixo” pela tabela de interpretação de EMBRAPA (2004), e aumentou com o incremento da concentração de sulfato ou de fosfato na solução nutritiva (Figura 20 e 21).

A resposta ao aumento de sulfato na solução era esperado, com o aumento da disponibilidade do nutriente, a planta apresenta concentrações maiores de enxofre nas folhas, apesar desse fato não resultar em aumento na produção de massa seca ou de outros índices produtivos, o que caracteriza o consumo de luxo, resultado também observado por Dev e Sagar (1974). Já o aumento na concentração foliar de enxofre, em resposta ao maior conteúdo de fósforo na solução nutritiva, pode ser explicado, da mesma forma que o comportamento do nitrogênio, pela concentração do nutriente nas folhas das plantas que se desenvolveram menos.

As plantas têm grande capacidade de se adaptar à disponibilidade de sulfato do meio, incrementando a capacidade de absorção das raízes em caso de carência e restringindo a absorção quando a disponibilidade é alta. A mudança de uma situação para outra é regulada pela concentração interna do nutriente e pode ocorrer em intervalos de tempo tão curtos como 24 h, observada no experimento de Clarkson et al. (1983). Isso explica a pequena variação de apenas 20% na concentração foliar deste nutriente, frente à grande variação na solução nutritiva.

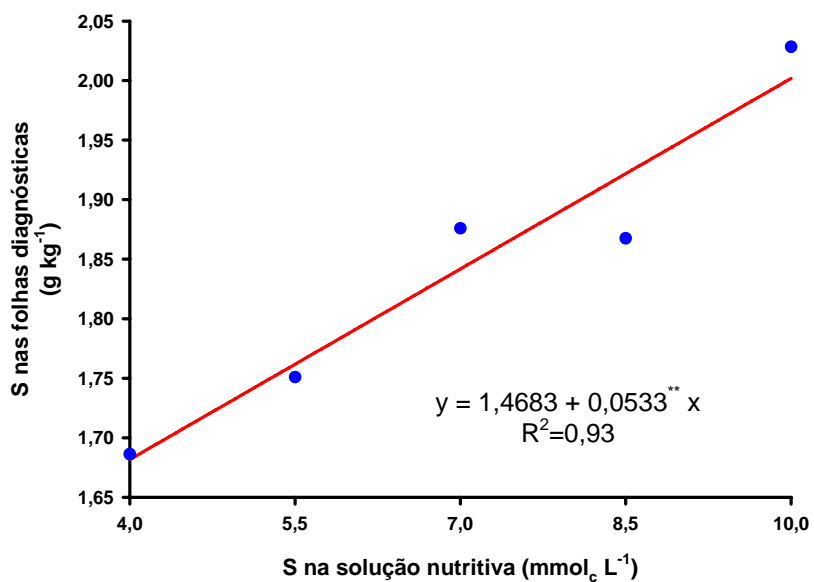


Figura 20 - Concentração de enxofre nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de sulfato na solução nutritiva

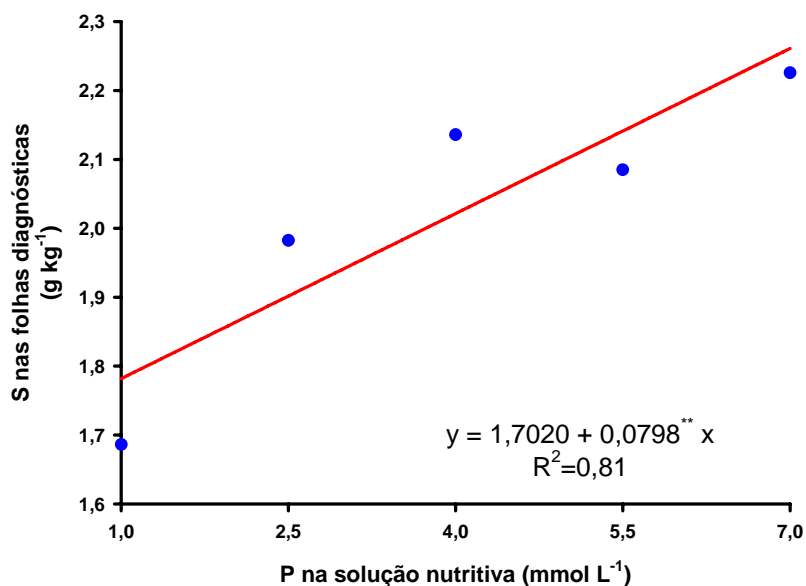


Figura 21 - Concentração de enxofre nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de fosfato na solução nutritiva

Em sua revisão, Fageria (2001) observa que há certa constância entre a relação N/S nas folhas de várias culturas estudadas. Este fenômeno está relacionado à proporção entre os dois elementos nas proteínas e à influência regulatória de um sobre a assimilação do outro, e é mais nítida quando analisados na fração orgânica.

Neste experimento, entretanto, foi observada alteração na relação N/S relacionado ao aumento da concentração de fosfato na solução nutritiva e ao menor desenvolvimento das plantas que isso ocasionou (Figura 22). Apesar do observado aumento na concentração de nitrogênio nas folhas diagnósticas, este aumento foi menor para nitrogênio que para o enxofre. Talvez esse fenômeno tenha sido provocado pelo maior efeito de inibição competitiva dos íons fosfato sobre nitrato que sobre o sulfato, sem, no entanto, ter provocado deficiência de nitrogênio.

Dev e Sagar (1974) observaram 12 variedades de soja em substrato com variados níveis de enxofre. A relação N/S-total foi elevada sob deficiência de enxofre e constante com o adequado suprimento do nutriente. Essa relação constante de N/S-total foi diferente entre as variedades e variou entre 16 e 22.

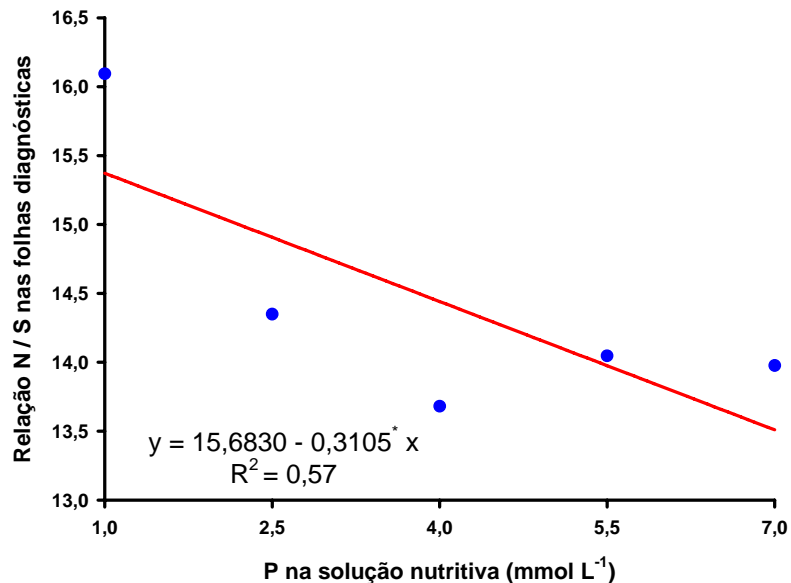


Figura 22 - Relação entre N e S nas folhas diagnósticas da soja, em função da concentração de fósforo da solução nutritiva

4.2.7 Boro

A concentração foliar média de boro nas folhas diagnósticas da soja crescida na solução controle deste experimento foi de $58,77 \text{ mg kg}^{-1}$, e pode ser classificada como “alta” pela tabela de interpretação de análise foliar por faixa de suficiência recomendada

por EMBRAPA (2004). Isso indica que a concentração de boro presente na solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) é suficiente para o crescimento da soja.

A concentração de boro nas folhas diagnósticas não apresentou alteração consistente com a variação na solução de nenhum dos nutrientes estudados neste experimento.

4.2.8 Cobre

Foi observado efeito significativo do fósforo da solução nutritiva sobre a concentração foliar de cobre na soja deste experimento. A média da concentração de cobre nas folhas diagnósticas das plantas cultivadas na solução controle foi igual a $5,44 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cu, classificada como “suficiente” pela recomendação de EMBRAPA (2004). Com a concentração de fosfato na solução nutritiva de $7 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$, as plantas apresentaram $3,97 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cu nas folhas diagnósticas, o que pode ser considerado como “baixo”, segundo a recomendação de EMBRAPA (2004). A relação entre os nutrientes foi representada por uma regressão linear (Figura 23).

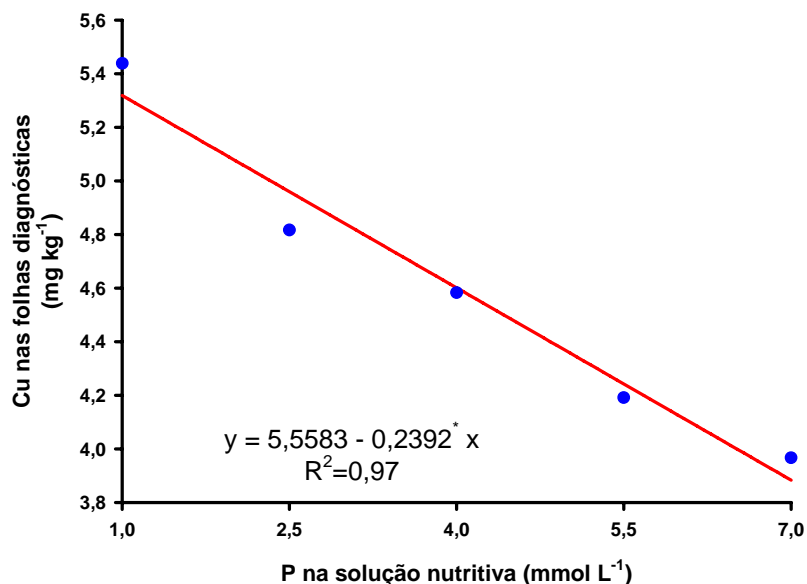


Figura 23 -Concentração de cobre nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de fosfato na solução nutritiva

Os valores observados neste trabalho são semelhantes àqueles obtidos por Wallace, Mueller e Alexander (1978). Em seu trabalho, o cobre nas folhas representou $6,6 \text{ mg kg}^{-1}$ da massa seca quando o fósforo na solução foi igual a $0,02 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ e

4,2 mg kg⁻¹ com 4 mmol_c L⁻¹ de P. Sob a mesma concentração de fósforo na solução nutritiva de 4 mmol_c L⁻¹, as plantas deste experimento apresentaram média de 4,6 mg kg⁻¹ de cobre nas folhas diagnósticas. A concentração foliar de cobre mais alta observada neste experimento foi 5,44 mg kg⁻¹, mas a concentração de fósforo na solução nutritiva testada foi maior (1 mmol_c L⁻¹).

Não foi observados, no entanto, sintomas semelhantes aos descritos por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), nem aos descritos por Borkert et al. (1994) para deficiência de cobre.

Em outras culturas, diversos trabalhos também mostraram a influência negativa do fósforo exageradamente fornecido às plantas sobre as concentrações foliares de cobre (BINGHAM; GARBER, 1960; BINGHAM, 1963; LOCASCIO; EVERETT; FISKELL, 1968; SPRATT; SMID, 1978; TIMMER; LEYDEN, 1980).

A ocorrência deste fenômeno em solução nutritiva endossa a afirmação de Murphy, Ellis e Adriano (1981), de que o efeito antagônico é de origem fisiológica e não que seja decorrente de reações de precipitação no solo.

4.2.9 Ferro

A concentração de ferro nas folhas diagnósticas da soja foi 144,90 mg kg⁻¹ quando crescidas na solução nutritiva controle. Este valor diminuiu para 116,60 mg kg⁻¹ com a concentração de potássio na solução nutritiva de 12 mmol_c L⁻¹ (Figura 24).

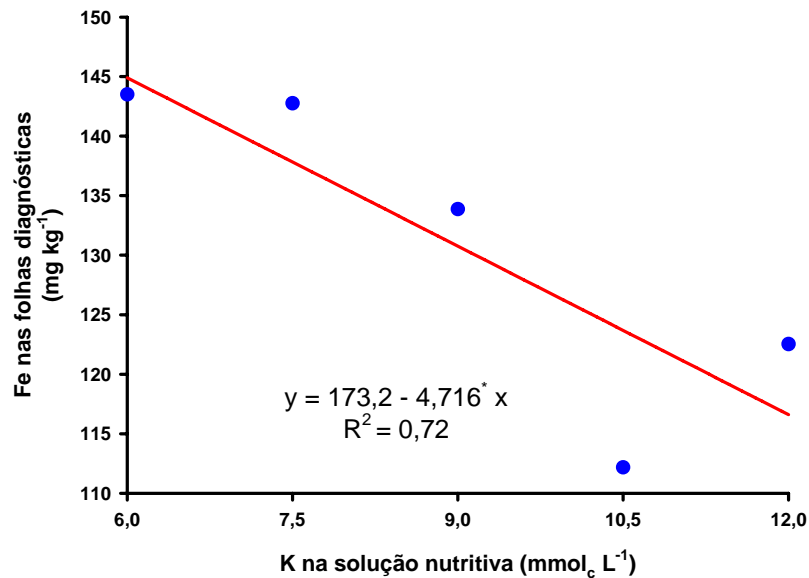


Figura 24 - Concentração de ferro nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de potássio na solução nutritiva

Estes resultados assemelham-se aos obtidos por Lingle; Tiffin e Brown (1963) testaram a influência de vários cátions sobre a absorção de ferro quelatizado com EDDHA. Eles utilizaram plantas com clorose generalizada, crescidas em solução nutritiva sem ferro. Em suas observações, o potássio foi capaz de provocar a redução da absorção do ferro a partir da concentração 1 mmol_c L⁻¹ na solução nutritiva. Concentrações de potássio maiores que 25 mmol_c L⁻¹ resultaram em absorção de ferro nula.

4.2.10 Manganês

Neste experimento, não foi observada influência dos tratamentos sobre a concentração de manganês nas folhas diagnósticas, que teve concentração média de 46,0 g kg⁻¹ (Tabela 9). Todos os resultados observados se enquadram na classificação “suficiente” segundo a recomendação de EMBRAPA (2004).

Ventura (1987) obteve teores foliares de manganês em soja da cultivar Paraná entre 86 e 94 mg kg⁻¹ com 3 mmol_c L⁻¹ de K⁺; 5 mmol_c L⁻¹ de Ca⁺² e 2 mmol_c L⁻¹ de Mg⁺². Estes teores caíram a 56, 64 e 63 mg kg⁻¹ com o aumento dos teores na solução nutritiva para 9 mmol_c L⁻¹ de K⁺, 15 mmol_c L⁻¹ de Ca⁺² ou 6 mmol_c L⁻¹ de Mg⁺²,

respectivamente. Apesar da diminuição esses valores ainda estariam classificados como normais pelo critério de interpretação de análise foliar da EMBRAPA (2004).

A redução na concentração de manganês observada por Ventura (1987) foi maior entre as concentrações mais baixas de Ca^{+2} , K^+ e Mg^{+2} . Com o aumento das concentrações dos três cátions, menos influência eles exerceram sobre o micronutriente, e a tendência deste foi de ter concentrações mais estáveis. No presente experimento, as concentrações de Ca^{+2} , K^+ e Mg^{+2} são ainda mais elevadas na solução nutritiva que as daquele trabalho, e não foram observadas alterações significativas na concentração foliar de manganês.

Este comportamento evidencia que o efeito inibitório da absorção de manganês por Ca^{+2} , K^+ e Mg^{+2} é do tipo não competitiva, concordando com a afirmação de Moreira et al. (2003).

Tabela 9 - Concentrações de manganês nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de magnésio na solução nutritiva (média de 8 repetições)

Mg^{+2} na solução ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	Mn na folha (mg kg^{-1})
4,0	48,16
5,5	43,59
7,0	45,80
8,5	50,45
10,0	40,69

4.2.11 Zinco

A concentração média de zinco observada nas folhas diagnósticas da soja foi $13,01 \text{ mg kg}^{-1}$. Este valor é considerado “baixo” pela classificação proposta por EMBRAPA (2004). Outros nutrientes, como nitrogênio e enxofre, também apresentaram concentração foliar baixa em relação à tabela de interpretação de análise foliar, mas são esperadas diferenças naturais entre os valores, devidas às diferenças de condição entre o ambiente de campo e da casa de vegetação (discutidas no item 4.2.1). Não

foram observados sintomas como os descritos por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) e Ohki (1977) para deficiência de zinco.

Galrão (1993) obteve como nível crítico para a concentração foliar de zinco nas folhas de soja cultivar Cristalina em Planaltina - DF o valor de $17,2 \text{ mg kg}^{-1}$, utilizando o mesmo procedimento de amostragem deste experimento. O valor obtido pelo autor também seria classificado como “baixo” pela tabela de interpretação de análise foliar de EMBRAPA (2004).

A concentração foliar de zinco não foi alterada pela presença de até 7 mmol L^{-1} de P na solução nutritiva (Tabela 10), nem pelos outros nutrientes estudados.

Tabela 10 – Concentração média de zinco nas folhas diagnósticas da soja em função da concentração de fosfato na solução nutritiva

H_2PO_4^- na solução (mmolc L^{-1})	P na folha (g kg^{-1})	Zn na folha (mg kg^{-1})
1,0	3,66	13,58
2,5	7,12	13,09
4,0	10,44	12,80
5,5	11,60	12,72
7,0	12,14	13,84

Segundo Loneragan e Webb (1993), sob condições em que nem fósforo nem zinco estejam em condição limitante ou excessiva, não há razão para esperar interação entre os dois nutrientes.

Manarin (2005) obteve pouca variação na concentração de zinco nas lâminas de folhas recém-expandidas do capim-Tanzânia quando as concentrações de fósforo na solução nutritiva variaram entre $0,2$ e $1,8 \text{ mmol L}^{-1}$ em dois cortes consecutivos. Apenas sob deficiência de fósforo foi observada a elevação da concentração foliar de zinco.

Marschner e Schropp (1977) observaram concentração de zinco foliar muito mais baixa nas plantas crescidas em solução nutritiva que em solo. Ao contrário do solo, na solução nutritiva, o fósforo não alterou a concentração foliar de zinco nem foram observados sintomas de deficiência deste elemento.

Paulsen e Rotimi (1968) encontraram resultados diferentes dos deste experimento, com as variedades de soja Chief e Lincoln. Em seu experimento, com as concentrações de P na solução nutritiva variando entre 1 e 7,5 mmol_c L⁻¹ a concentração foliar de zinco foi reduzida de 25,2 para 12,8 mg kg⁻¹ na variedade Chief e de 24,4 para 15,6 mg kg⁻¹ na variedade Lincoln. As menores concentrações de zinco obtidas por eles, no entanto, é similar ao valor observado neste experimento.

Freire (1978), obteve variação na concentração foliar de zinco de 94 para 60,7 g kg⁻¹ com a aplicação do equivalente a 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Para a interpretação destes dados há que se considerar que as plantas que não receberam adubação fosfatada sofreram restrição ao crescimento pela carência de fósforo. A elevação do fosfato aplicado, do equivalente a 200 kg ha⁻¹ para 400 kg ha⁻¹ resultou em alteração não significativa na concentração foliar de zinco.

Wallace; Mueller e Alexander (1978), que examinaram o efeito do fósforo em cinco cultivares diferentes de soja, notaram a depressão da concentração de zinco nas folhas com o aumento da concentração de fosfato na solução nutritiva. Os autores utilizaram solução nutritiva com concentração de zinco 2,5 vezes maior que a deste experimento. Naquele trabalho, o zinco nas folhas representou 97 mg kg⁻¹ da matéria seca quando o fósforo na solução foi igual a 0,02 mmol_c L⁻¹ e 26 mg kg⁻¹ com 4 mmol_c L⁻¹ de P. Há que se considerar, também, que as plantas submetidas à menor dose de P encontravam-se deficientes neste nutriente.

4.3 Sintomatologia sob excesso de fósforo

Nos tratamentos em que fósforo foi adicionado à solução em altas doses, acompanhado por qualquer dos cátions testados, as plantas desenvolveram o sintoma: amarelecimento amarronzado, internerval das folhas velhas, que progredia para necroses das bordas e áreas cloróticas e culminava na abscisão dos folíolos (Figura 25 a 28). A análise química das folhas diagnósticas das plantas que apresentaram estes sintomas indicou a presença de concentrações de fósforo sempre maiores que 7 g kg^{-1} .

Estes sintomas concordam com os observados por Mooy e Pesek (1969) em plantas de soja que receberam altas concentrações de P em vasos. Os sintomas observados por esses autores foram menos intensos nos vasos que receberam também cálcio, potássio ou ambos, indicando que a restrição ao crescimento das plantas sob deficiência destes dois nutrientes e o efeito de concentração de P nas folhas deve ter contribuído para a ocorrência dos sintomas. No mesmo experimento, não foi observado efeito corretivo da aplicação foliar de Zn nem de Fe.

Porém esses sintomas também assemelha-se aos descritos por Bergmann (1992) para deficiência de Zn em soja, embora o mesmo autor cite que não podem ser considerados sintomas característicos de deficiência de zinco. Também afirma que este tipo de sintomatologia varia com o cultivar dentro de uma espécie vegetal. Estes sintomas também se enquadram na descrição feita por Nelson e Barber (1964) e citada por Rosolem, Quaggio e Silva (2001) e Borkert et al. (1994) para a deficiência de zinco, mas é um sintoma também esperado em folhas novas. Não foi possível correlacionar, entretanto, concentrações baixas de nenhum nutriente associadas aos vasos em que ocorreu o sintoma. Uma possibilidade considerada é a de que tenha ocorrido a inativação do zinco no vegetal, como o descrito por Cakmak e Marschner (1987).

Os sintomas, no entanto, discordam dos descritos por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) e dos descritos por Ohki (1977), que descreve o sintoma de deficiência de zinco como as folhas novas exibindo aparência rugosa provocada pela depressão da área das nervuras, de cor verde escura com clorose internerval pontilhada em pequenas áreas, não proeminente sobre toda a superfície foliar e áreas necróticas associadas aos pontos cloróticos. Nas folhas velhas apresentavam clorose internerval intensa com as nervuras e as áreas adjacentes a ela permanecendo verdes.

Segundo Marschner (1995) e Loneragan e Webb (1993), em solução nutritiva com alta concentração de fósforo, mas baixa de zinco, a deficiência de zinco freqüentemente induz a conteúdos excepcionalmente altos de fósforo, como os observado por Freire (1978) e Paulsen e Rotimi (1968) em soja; Ibrick; Moraghan (1993) em soja e feijão; Boawn e Brown (1968), em feijão e batata; Webb e Loneragan (1988), em trigo; Manarin (2005), em capim-Tanzânia; e Loneragan et al. (1982), em quiabo. Assim, os sintomas de deficiência de zinco podem, às vezes, ser confundidos ou intensificados pela toxidez de fósforo (WEBB; LONERAGAN, 1988; CHRISTENSEN; JACKSON, 1981).

Desta forma, apesar do respaldo bibliográfico, os resultados obtidos até aqui permitem estabelecer uma relação causal dos sintomas observados apenas com a concentração foliar elevada de fósforo, razão pela qual serão chamados apenas de “toxidez de fósforo”, sem que a hipótese de “deficiência de zinco induzida por fósforo” seja totalmente descartada.



Figura 25 - Planta com sintoma nas folhas basais

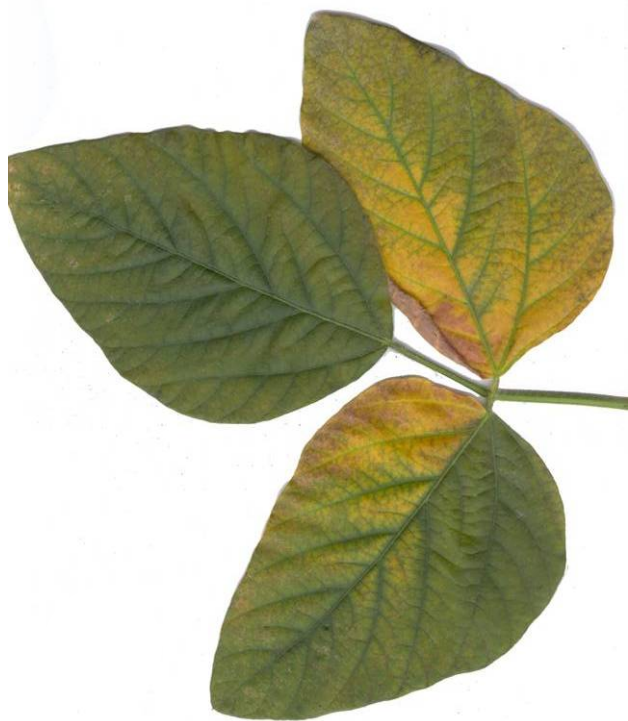


Figura 26 - Folha com clorose e necrosamento dos bordos



Figura 27 - Folha clorótica



Figura 28 - Foliolo com clorose e nervuras ainda verdes

5 CONCLUSÕES

Fósforo foi o único nutriente que provocou toxidez às plantas, caracterizada pela redução da acumulação de massa seca. Este nutriente acumulou-se nas folhas diagnósticas em concentrações de até $12,8 \text{ g kg}^{-1}$.

Com concentrações foliares maiores que 7 g kg^{-1} de P, as plantas apresentaram clorose amarelo-amarronzada internerval nas folhas velhas que progrediu para necrose e abscisão, e acumularam menor quantidade de massa seca, sofrendo alteração da relação entre parte aérea e raízes.

Nos tratamentos com menores produções de massa seca pelas plantas, houve efeito de concentração de nitrogênio, potássio e enxofre.

Fósforo, potássio, magnésio e enxofre tiveram a concentração foliar aumentada em resposta ao aumento de sua concentração na solução nutritiva. Cálcio, entretanto, não teve a concentração foliar aumentada com o aumento de sua concentração na solução.

A concentração foliar de cálcio foi menor nas folhas das plantas que cresceram nas soluções com mais altas concentrações de potássio e magnésio, mas as concentrações foliares de potássio e de magnésio não foram reduzidas por concentrações mais altas de outros cátions na solução nutritiva.

As mais altas concentrações de potássio na solução nutritiva provocaram menor concentração de ferro nas folhas diagnósticas.

O aumento da concentração de fósforo na solução nutritiva resultou na diminuição do teor de cobre, mas não do de zinco nas folhas diagnósticas.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. P.; MACHADO, C. T. T. Fósforo. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. cap. 10, p. 253-280.

BATAGLIA, O.C.; DECHEN, A.R.; SANTOS, W. R. Princípios da diagnose foliar. In: ALVAREZ, V.H.; FONTES, L.E.; FONTES, M.P.F. (Ed.). **O solo nos grandes domínios morfológicos do Brasil e o desenvolvimento sustentável**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Universidade Federal de Viçosa, 1996. p.646-659.

BELL, P. F.; HALLMARK, W. B.; DOMBECK, D. G. Diagnosing nutrient deficiencies in soybean, using M-DRIS and critical nutrient level procedures. **Agronomy Journal**, Madison, v. 87, p. 859-865, 1995.

BERGMANN, W. **Nutritional disorders of plants: development, visual and analytical diagnosis**. 2nd Ed. New York: Gustav Fischer Publishing House Jena, 1992. 741p.

BINGHAN, F. T. Relation between phosphorus and micronutrients in plants. **Soil Science Society of America Proceedings**, Ann Arbor, v. 27, p. 389-391, 1963.

BINGHAN, F. T.; GARBER, M. J. Solubility and availability of micronutrients in relation to phosphorus fertilization. **Soil Science Society of America Proceedings**, Ann Arbor, v. 24, p. 209-213, 1960.

BLOOM, A. J. Nutrição mineral. In: TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Tradução de E. R. Santarém et al. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. cap. 5, p. 95-113.

BOAWN, L. C.; BROWN, J. C. Further evidence for a P-Zn imbalance in plants. **Soil Science Society of America Proceedings**, Ann Arbor, v. 32, p. 94-97, 1968.

BOAWN, L. C.; LEGGETT, G.E. Phosphorus and zinc concentrations in russet Burbank potato tissues in reaction to development of zinc deficiency symptoms. **Soil Science Society of America Proceedings**, Ann Arbor, v.28, p.229-232, 1964.

BORKERT, C. M.; SILVA, D. N. DA; SFREDO, G. J. Calibração de potássio nas folhas de soja em latossolo roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, p. 227-230, 1993.

BORKERT, C.M.; YORINORI, J.T.; CORREA-FERREIRA, B.S.; ALMEIDA, A.M.R.; FERREIRA, L.P.; SFREDO, G.J. Seja o doutor da sua soja. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n.66, jun. 1994. **Arquivo do Agrônomo**, Piracicaba, n.5, p.1-16, jun. 1994.

CAKMAK, I.; MARSCHNER, H. Mechanism of phosphorus-induced zinc deficiency in cotton. I. Zinc deficiency-enhanced uptake rate of phosphorus. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 68, p. 483-490, 1986.

CAKMAK, I.; MARSCHNER, H. Mechanism of phosphorus-induced zinc deficiency in cotton. III. Changes in physiological availability of zinc in plant. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.70, p.13-20, 1987.

CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A.; PERES, L. E. P. **Manual de fisiologia vegetal: teoria e prática**. Piracicaba: Ceres, 2005. 650 p.

CHRISTENSEN, N. W.; JACKSON, T. L. Potential for phosphorus toxicity in zinc-stressed corn and potato. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 904-909, 1981.

CLARKSON, D. T.; SMITH, F. W.; BERG P. J. vanden. Regulation of sulphate transport in a tropical legume, *Macroptilium atropurpureum*, cv. Siratro. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 34, p. 1463-1483, 1983.

CONSOLMAGNO NETO, D. **Combinação de doses de potássio e magnésio na produção e nutrição mineral do capim-Tanzânia**. 2006. 82p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

COODETEC. **Cultivar de soja CD 208**. Disponível em: <<http://www2.coodetec.com.br/coodetec/produto.action?culturalId=3&produtoId=8>>. Acesso em: 14 dez. 2006.

DAL BÓ, M. A.; BECKER, M., BASSO C.; STUKER, H. Levantamento do estado nutricional da videira em Santa Catarina por análise de solo e tecido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 335-340, 1989.

DATTA, K. S.; KUMAR, A.; VARMA, S. K.; ANGRISH, R. Differentiation of chloride and sulphate salinity on the basis of ionic distribution in genetically diverse cultivars of wheat. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 18, n. 10, p. 2199-2212, 1995.

DEV, G.; SAGAR, S. Effect of sulfur fertilization on the N-S ratio in soybean varieties. **Agronomy Journal**, Madison, v. 66, p. 454-456, 1974.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Tecnologias de produção de soja**: região central do Brasil 2005. Londrina: Embrapa Soja, 2004. 239p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants**: Principles and perspectives. 2nd ed. Sunderland: Sinauer, 2005. 225 p.

FAGERIA, V.D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.24, p.1269-1290, 2001.

FEHR, W.R., CANVINESS, C.E., BURMOOD, D.T. AND PENNINGTON, J.S. Stage of development descriptions for soybean *Glycine max* (L) Merrill. **Crop Science**, Madison, v. 11, p. 929-931, 1971.

FINKE, R. L.; HARPER, J. E.; HAGEMAN, R. H. Efficiency of nitrogen assimilation by N₂-fixing and nitrate-grown soybean plants (*Glycine max* [L.] Merr.). **Plant Physiology**, Rockville, v. 70, p. 1179-1184, 1982.

FLETCHER, H. F.; KURTZ, L. T. Differential effects of phosphorus fertility on soybean varieties. **Soil Science Society of America Proceedings**, Ann Arbor, v. 28, p. 225-228, 1964.

FONSECA, J. A. da; MEURER, E. J. Inibição da absorção de magnésio pelo potássio em plântulas de milho em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 47-50, 1997.

FOOTE, B. D.; HOWELL, R. W. Phosphorus tolerance and sensitivity of soybeans as related to uptake and translocation. **Plant Physiology**, Rockville, v. 39, p. 610-613, 1964.

FREIRE, F.M. **Produção de matéria seca, nodulação e absorção de nutrientes pela soja [*Glycine max* (L.) Merrill], em função de níveis de fósforo e zinco, em solos de Minas Gerais**. 1978. 74p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1978.

GALRÃO, E. Z. Níveis críticos de zinco em latossolo vermelho-amarelo argiloso sob cerrado para a soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 83-87, 1993.

GARCIA, M.; DAVEDERE, C.; GALLEGOS, P.; TOUMI, M. Effect of various Potassium-Calcium ratios on cation nutrition of grape grown hydroponically. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 22, n. 3, p. 417-425, 1999.

GOMEZ, K. A. ; GOMEZ, A. A. **Statistical procedures for agricultural research**. 2nd ed. New York: International Rice Research Institute; John Willey, 1984. p. 357-423.

GREEN, D. G.; WARDER, F. G. Accumulation of damaging concentrations of phosphorus by leaves of Selkirk Wheat. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 38, p. 567-572, 1973.

GROVE, J. H.; THOM, L. W.; MURDOCK, L. W.; HERBEK, J. H. Soybean response to available potassium in three silt loam soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 1231-1238, 1987.

HEENAN, D. P.; CAMPBELL, L. C. Influence of potassium and manganese on growth and uptake of magnesium by soybeans (*Glycine max* (L.) Merr. cv. Bragg). **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 61, p. 447-456, 1981.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water-culture method for growing plants without soil**. Berkeley: College of Agriculture, University of California, 1950. 32 p. (California Agricultural Experiment Station Circular, 347).

HOWELL, R. W. Phosphorus nutrition of soybeans. **Plant Physiology**, Rockville, v. 29, p. 477-483, 1954.

HOWELL, R. W.; BERNARD, R. L. Phosphorus response of soybean varieties. **Crop Science**, Madison, v. 1, p. 311-313, 1961.

IBRIKCI, H.; MORAGHAN, J. T. Differential responses of soybean and dry bean to zinc deficiency. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 16, p. 1791-1805, 1993.

ISRAEL, D. W.; JACKSON, W. A. Ion balance, uptake, and transport process in N₂-fixing and nitrate- and urea-dependent soybean plants. **Plant Physiology**, Rockville, v. 69, p. 171-178, 1982.

JARREL, W. M.; BEVERLY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**, New York, v. 34, p. 197-224, 1981.

KEOGH, J. L.; SABBE, W. E.; CAVINESS, C. E. Nutrient concentration of selected soybean cultivars. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 3, n. 1, p. 29 - 35, 1972.

LEFEBVRE, D. D.; GLASS, A. D. M. Regulation of phosphate influx in barley roots; effect of phosphate deprivation and reduction of influx with provision of orthophosphate. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 54, p. 199-206, 1982.

LEGGET, J. E.; GILBERT, W. A. Magnesium uptake by soybeans. **Plant Physiology**, Rockville, v. 44, p. 1182 – 1186, 1969.

LINGLE, J. C.; TIFFIN, L. O.; BROWN, J. C. Iron uptake-transport of soybeans as influenced by other cations. **Plant Physiology**, Rockville, v. 38, p. 71-76, 1963.

LOCASCIO, S. J.; EVERETT, P. H.; FISKELL, J. G. A. Effects of phosphorus sources and copper rates on watermelons. **Proceedings of the American Society of Horticultural Science**, Geneva, v. 92, p. 583-589, 1968.

LONERAGAN, J.F.; WEBB, M. J. Interactions between zinc and other nutrients affecting the growth of plants. In: Robson, A. D. (Ed). **Zinc in Soils and Plants**. Dordrecht: Kluwer, 1993. p. 119-134.

LONERAGAN, J. F.; GROVE, T. S.; ROBSON, A. D.; SNOWBALL, K. Phosphorus toxicity as a factor in zinc-phosphorus interaction in plants. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, n. 5, p. 966-972, 1979.

LONERAGAN, J.F.; GRUNES, D.L.; WELCH, R.M.; ADUAYI, E. A.; TENGAH, A.; LAZAR, V. A.; CARY, E. E. Phosphorus accumulation and toxicity in leaves in relation to zinc supply. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, p. 345-352, 1982.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. ; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFÓS, 1997. 319p.

MANARIN, S.A. **Combinações de doses de fósforo e de zinco em solução nutritiva para o capim-Tanzânia**. 2005. 68p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd Ed., London: Academic Press, 1995. 889p.

MARSCHNER, H; SCHROPP, A. Comparative studies on the sensitivity of six rootstocks varieties of grapevine to phosphate-induced Zn deficiency. **Vitis**, Siebeldingen, v. 16, p. 79-88, 1977.

MASCARENHAS, H. A. A.; NEPTUNE, A. M. L.; MURAOKA, T.; BULISANI, E. A.; HIROCE, R. Absorção de nutrientes por cultivares de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, p. 92-96, 1980.

MILLS, H. A.; JONES JR, J. B. **Plant analysis handbook II: a practical sampling, preparation, analysis, and interpretative guide**. Athens: MICROMACRO, 1996. 422 p.

MOOY, C. J. DE; PESEK, J. Growth and yield of soybeans lines in relation to phosphorus toxicity and phosphorus, potassium, and calcium requirements. **Crop Science**, Madison, v. 9, p. 130-134, 1969.

MOREIRA, M.A.; FONTES, P.C.R.; CAMARGOS, M.P. Interação zinco e fósforo em solução nutritiva influenciando o crescimento e a produtividade da alfaca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, p.903-909, 2001.

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; HEINRICHS, R.; TANAKA, R. T. Influência do magnésio na absorção de manganês e zinco por raízes destacadas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, p. 95-101, jan. 2003.

MUNSON, R. D.; NELSON, W. L. Principles and practices in plant analysis. In: WALSH, L. M.; BEATON, J. D. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1973. Chap. 15, p. 223-248.

MURPHY, L. S.; ELLIS R.; ADRIANO, D. C. Phosphorus-micronutrient interaction effects on crop production. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 3, p. 593-613, 1981.

NELSON, W. L.; BARBER, S. A. Nutritional deficiencies in legumes for grain and forrages. In: SPRAGUE, H. B. **Hunger signs in crops**. New York: David McKay, 1964. p. 145-164.

OHKI, K. Critical zinc levels related to early growth and development of determinate soybeans. **Agronomy Journal**, Madison, v. 69, p. 969-974, 1977.

OLSEN, S.R. Micronutrient interactions. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M.; LINDSAY, W.L. (Ed). **Micronutrients in Agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p.243-261.

PAL, U. R.; OLUFAJO, O. O.; NNADI, L. A.; SINGH, L. Reponse of soya bean (*Glycine max* (L.) Merr.) to phosphorus, potassium and molybdenium applications. **Journal of agricultural Science**, Cambridge, v. 112, p. 131-136, 1989.

PAULI, A.W.; ELLIS, R.; MOSER, H.C. Zinc uptake and translocation as influenced by phosphorus and calcium carbonate. **Agronomy Journal**, Madison, v.60, p.394-396, 1968.

PAULSEN, G. M.; ROTIMI, O. A. Phosphorus-zinc interaction in two soybean varieties differing in sensivity to phosphorus nutrition. **Soil Science Society of America Proceedings**, Ann Arbor, v. 32, p. 73-76, 1968.

QUAGGIO, J. A.; DECHEN A. R.; RAIJ, B. van. Efeito da aplicação de calcário e gesso sobre a produção de amendoim e lixiviação de bases no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 6, p. 189-194, 1982.

QUAGGIO, J. A.; MASCARENHAS H. A. A.; BATAGLIA, O. C. Reposta da soja à aplicação de doses crescentes de calcário em Latossolo Roxo distrófico de Cerrado. II – efeito residual. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 6, p. 113-118, 1982.

REINBOTT, T.M.; BLEVINS, D.G. Phosphorus and magnesium fertilization interaction with soil phosphorus level: tall fescue yield and mineral element content. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v.10, p.260-265, 1997.

ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R.; MAIA, I. G. E NAKAGAWA, J. Resposta da soja ao magnésio do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p. 47-54, 1992.

ROSOLEM, C. A.; QUAGGIO, J. A.; SILVA, N. M. da. Algodão, Amendoim e Soja. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. da; RAIJ, B. van; ABREU, C. A. (Ed.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq / FAPESP / POTAFOS, 2001. cap. 13, p. 319-354.

ROSSITER, R. C. Phosphorus toxicity in subterranean clover and oats grown on muchea sand, and the modifying effects of lime and nitrate-nitrogen. **Australian Journal of Agricultural research**, Melbourne, v. 3, p. 227-243, 1952.

SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. **Análises químicas em plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1974. 56p.

SILVEIRA, C.P. **Produção e nutrição mineral do capim-Tanzânia com variável disponibilidade de nitrogênio e cálcio**. 2005. 87p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SMITH, F. W.; LONERAGAN, J. F. Interpretation of plant analysis: concepts and principles. In: REUTER, D. J.; ROBINSON, J. B. (Ed.). **Plant analysis: an interpretation manual**. Collingwood: CSIRO, 1997. chap 1, p. 1-33.

SPRATT, E. D.; SMID, A. E. Yield and elemental composition of flax affected by P and micronutrients. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, p. 633-638, July-Aug. 1978.

TENG, Y.; TIMMER, V. R. Phosphorus-induced micronutrient disorders in hybrid poplar. I. Preliminary diagnosis. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 126, p. 19-29, 1990.

TIMMER, V. R.; TENG, Y. Phosphorus-induced micronutrient disorders in hybrid poplar. II. Responses to zinc and copper in greenhouse culture. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 126, p. 31-39, 1990.

TIMMER, L. W.; LEYDEN, R. F. The relationship of mycorrhizal infection to phosphorus-induced copper deficiency in sour orange seedlings. **New Phytologist**, London, v. 85, p. 15-23, 1980.

VENTURA, C. A. D. **Níveis de potássio, cálcio e magnésio em solução nutritiva influenciando o crescimento e a composição da soja [*Glycine max* (L.) Merrill], cv. Paraná**. 1987. 65 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

WALLACE, A.; MUELLER, R. T.; ALEXANDER, G. V. Influence of phosphorus on zinc, iron, manganese, and copper uptake by plants. **Soil Science**, New Brunswick, v. 126, p. 336-341, 1978.

WEBB, M. J; LONERAGAN, J.F. Effect of zinc deficiency on growth, phosphorus concentration, and phosphorus toxicity of wheat plants. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 1676-1680, 1988.

WEBER; CALDWELL. Soybean chlorosis from heavy fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, n. 5, p. 425-427, 1962.

WESTHEIMER, F. H. Why nature chose phosphates. **Science**, Washington, v. 235, p. 1173-1178, 1987.

YIN, X.; VYN, T. Critical leaf potassium concentrations for yield and seed quality of conservation-till soybean. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 1626-1634, 2004.