



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

LUCAS OLIVEIRA SANTOS

**INTERAÇÃO CALCÁRIO E COBRE NA SOJA**

---

Londrina  
2020

LUCAS OLIVEIRA SANTOS

## **INTERAÇÃO CALCÁRIO E COBRE NA SOJA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Adônis Moreira

Londrina  
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

S237in Santos, Lucas Oliveira.

Interação calcário e cobre na soja / Lucas Oliveira Santos. - Londrina, 2020.  
48 f. : il.

Orientador: Adônis Moreira.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2020.  
Inclui bibliografia.

1. Soja - Tese. 2. Plantas - Nutrição - Tese. 3. Química do solo - Tese. 4. Solos - Teor de cobre - Tese. I. Moreira, Adônis . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

CDU 63

LUCAS OLIVEIRA SANTOS

## **INTERAÇÃO CALCÁRIO E COBRE NA SOJA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Adônis Moreira  
Embrapa Soja/UEL

---

Profa. Dra. Adriana Pereira da Silva  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Profa. Dra. Juliana Aparecida Souza  
Centro Universitário de Ourinhos - UNIFIO

---

Prof. Dr. Elemar Voll  
Embrapa Soja

---

Profa. Dra. Gisele Silva Aquino  
Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR

Londrina, 20 de fevereiro de 2020.

# Agradecimentos

À DEUS Onipresente, Onisciente e Onipotente;

À meus pais, Nelson Martins dos Santos e Milca Oliveira Santos, por sempre acreditarem em mim;

À minha irmã, Raquel Oliveira Santos por ser um exemplo sobre nunca desistir;

À Universidade Estadual de Londrina (UEL) pela oportunidade oferecida;

À CAPES pela bolsa de Mestrado concedida;

À Embrapa Soja pela apoio logístico e infraestrutura para realização dos experimentos;

Ao meu orientador, Dr. Adônis Moreira não só pela constante orientação neste trabalho, mas sobretudo pela amizade;

À Pesquisadora, Dra Larissa A. C. Moraes, pelo apoio nas análises e ensinamentos;

Ao Claudinei Toledo, do Laboratório de Ecofisiologia Vegetal da Embrapa, por me lembrar sobre a importância de “abrir portas”, grande amigo;

Aos professores da UEL pelos conhecimentos transmitidos;

À Banca examinadora pelas sugestões no trabalho;

Aos Técnicos do Laboratório de Solos da UEL, em especial ao Márcio Praxedes e João Machado;

Aos colegas, Rafael Petineli e Dionísio Andrade pela parceria no aprendizado, análises e condução dos experimentos;

À Maria Hizabel Fernandes, Marcelo Fontes (PIBIC), José Eduardo, Daniel e Bruna Miguel (UNESP), pelo apoio nas análises;

A todos colegas da Pós-Graduação que de forma direta ou indireta contribuíram para realização deste trabalho.

*“Para aprender, é preciso amar a disciplina; é estúpidez odiar a repreensão.”*

**(Provérbios 12.1 – NVT)**

SANTOS, Lucas Oliveira. **Interação calcário e cobre na soja**. 2020, 49 f. Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

## RESUMO

A aplicação de doses elevadas de calcário pode acarretar deficiência de cobre (Cu) devido à forte afinidade dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Cu}^{2+}$  pelo mesmo sítio de absorção. Nesse contexto, observa-se a necessidade de se definir a dose e nível crítico de Cu para na presença de alta concentração de calcário no solo. Para tal, foi realizado experimento em condições de casa de vegetação em vasos de barro com três litros de capacidade com a cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill], cultivar M 5947 IPRO em delineamento inteiramente ao acaso em esquema fatorial  $2 \times 5$ , em dois tipos de solo com diferentes teores de argila [i) Latossolo Vermelho distrófico,  $630 \text{ g kg}^{-1}$  de argila e  $210 \text{ g kg}^{-1}$  de areia e ii) Neossolo Quartzarênico,  $59 \text{ g kg}^{-1}$  de argila e  $915 \text{ g kg}^{-1}$  de areia] com quatro repetições. Os tratamentos que constaram de cinco doses de Cu (0, 2, 4, 8 e  $16 \text{ mg kg}^{-1}$  - fonte  $\text{CuSO}_4$ ) e duas doses de calcário dolomítico (0 e  $5 \text{ t ha}^{-1}$ , > 13% de MgO). Houve interação significativa de tipo de solo  $\times$  doses de Cu e na média, a soja respondeu a adubação com Cu e aplicação e calcário, o mesmo foi observado para produção de matéria seca da parte aérea, número de vagens e volume de raízes, o mesmo não foi observado para interação calcário  $\times$  Cu. Os atributos químicos do solo e os teores dos nutrientes nas folhas e nos grãos foram influenciados somente pelo tipo solo e doses de calcário, enquanto nos componentes fisiológicos houve efeito dos tratamentos para a taxa fotossintética, taxa respiratória, teor de clorofila e concentração interna de  $\text{CO}_2$ .

**Palavras-chave:** atributos químicos solo; componentes de produção; estado nutricional das plantas; *Glycine max*.

SANTOS, Lucas Oliveira. **Liming and copper interaction in soybean plants**. 2020. 49 p. Master in Agronomy – Londrina State University, Londrina, 2020.

### ABSTRACT

The high limestone rates application can lead to copper (Cu) deficiency due to the strong affinity of the  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Cu}^{2+}$  ions for the same uptake site. In this context, there is a need to define the rate and critical level of Cu for the presence of high concentration of limestone in the soil. An experiment was carried out in greenhouse conditions in clay pots with three liters of capacity with soybean [*Glycine max* (L.) Merrill], M 5947 IPRO cultivar in a completely randomized design in a 2 × 5 factorial scheme, in two types of soil with different clay contents [i) Dystrophic Red Latosol (Oxisol), 630 g kg<sup>-1</sup> of clay and 210 g kg<sup>-1</sup> of sand and ii) Neossol Quartzarenic (Quartzipsamment), 59 g kg<sup>-1</sup> of clay and 915 g kg<sup>-1</sup> of sand] with four replicates. The treatments consisted of five Cu rates (0, 2, 4, 8, and 16 mg kg<sup>-1</sup> - source CuSO<sub>4</sub>) and two dolomitic limestone rates (0 and 5 Mg ha<sup>-1</sup>, >13% MgO). There was a significant soil type × Cu rates interaction and on average, soybeans responded to Cu fertilization and limestone application, the same was observed for shoot dry weight yield (SDWY), number of pods and root volume. The result was not observed for limestone × Cu interaction. Only the soil type and limestone rates influenced the soil chemical attributes and the nutrients levels in the leaves and grains, while in the physiological components there was an effect of the treatments for the photosynthetic rate, respiratory rate, chlorophyll content and internal CO<sub>2</sub> concentration.

**Keywords:** *Glycine max*; soil chemical attributes; yield components; nutritional state of plants.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>10</b>
2.1	A CULTURA DA SOJA .....	10
2.2	CALAGEM .....	11
2.3	COBRE NO SOLO.....	13
2.4	COBRE NA PLANTA .....	17
2.5	INTERAÇÃO CÁLCIO E COBRE (CA VS CU) .....	26
<b>3</b>	<b>HIPÓTESES</b> .....	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>29</b>
5.1	INTERAÇÃO CALCÁRIO E COBRE NA PRODUÇÃO, FERTILIDADE DO SOLO E ESTADO NUTRICIONAL DA SOJA.....	29
5.1.1	Resumo .....	29
5.1.2	Introdução.....	30
5.1.3	Material e Métodos .....	31
5.1.4	Resultados e Discussão .....	34
5.1.5	Conclusões.....	37
5.1.6	Agradecimentos.....	38
5.1.7	Figuras.....	39
5.1.8	Tabelas.....	40
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS</b> .....	<b>44</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A ausência de operações de preparo e incorporação dos corretivos da acidez, do acúmulo de restos vegetais e de adubos na camada superficial do solo, a semeadura direta pode interferir neste manejo de adubação na disponibilidade de nutrientes, especialmente dos micronutrientes: cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn).

A disponibilidade dos micronutrientes para as plantas está diretamente relacionada com o pH do solo. Com o aumento da concentração de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) advindo da aplicação de grandes quantidades de calcário, seja dolomítico ou calcítico em superfície em áreas de plantio, têm-se observado uma diminuição da disponibilidade de micronutrientes metálicos no solo, como no caso do cobre (Cu), podendo induzir sintomas de deficiência nas plantas.

Embora exigido em pequenas quantidades, o Cu é essencial para o desenvolvimento das culturas, uma vez que desempenha importante papel na nutrição mineral das plantas, atuando como ativador de enzimas em diversos processos bioquímicos e fisiológicos, como a fotossíntese, respiração, regulação hormonal, fixação de nitrogênio (FBN) e metabolismo de compostos secundários.

O fornecimento de Cu às culturas pode ser feito diretamente no solo, na forma de fertilizantes, ou na planta através de adubação foliar ou ainda por meio do tratamento de sementes ou fungicidas cúpricos. As fontes mais utilizadas podem ser sulfatos, hidróxidos, óxidos de cobre (CuO) e defensivos a base de Cu.

Pesquisas têm mostrado deficiências ou toxidez de alguns elementos no solo, inclusive com aparecimento de sintomas visuais na planta. Essas alterações em algumas propriedades químicas de solo estão ocorrendo em SPD, o que não ocorria no modelo de cultivo anteriormente utilizado, no qual se baseava no revolvimento da camada superficial do solo.

Em relação ao Cu, sintomas de deficiência nas culturas anuais, como a soja são cada vez mais frequentes e o teores foliares encontrados estão, muitas vezes no limite ou abaixo dos níveis críticos considerados adequados.

O uso contínuo de calcário sem o manejo adequado da adubação com Cu pode influenciar negativamente o rendimento de grãos e os componentes de

produção da soja e do trigo, para isso, este trabalho foi realizado com o objetivo de definir níveis críticos e avaliar os efeitos da adubação com Cu na produção, estado nutricional, componentes de produção, componentes fisiológicos e atributos químicos do solo de soja em diferentes níveis calcário e argila.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A CULTURA DA SOJA

A cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é considerada a principal cultura de grãos do país (CONAB, 2016), com produção prevista de 122,4 milhões de toneladas para a safra 2019/20 (IBGE, 2020). Em termos mundiais também apresenta expressiva importância agrícola e sua produção para a safra 2016/2017 foi de, aproximadamente, 348 milhões de toneladas. O grão apresenta alto teor de proteína de boa qualidade (40%) e óleo (20%), o que consiste em uma de suas principais características (SEDIYAMA et al., 2009).

Aproximadamente 90% dos grãos consumidos geram farelo e óleo na proporção de 80:20, portanto, o principal produto gerado nesse processo é o farelo, que, junto com o milho (*Zea mays* L.), constitui a matéria-prima para a fabricação de rações, sendo o seu principal produto derivado e dependente do mercado de carnes (HIRAKURI; LAZAROTTO, 2014). Outras formas de utilização do grão, porém em menor expressão, incluem produtos como óleo e proteína para a alimentação humana e ainda produção de biodiesel (MASUDA; GOLDSMITH, 2009).

A soja é uma cultura anual, cujo ciclo de desenvolvimento pode variar de 75 até 200 dias, dependendo da genética de cada cultivar. A identificação dos estádios de desenvolvimento é fundamental para o sistema de produção, sendo a descrição mais utilizada a de Fehr et al. (1971).

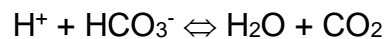
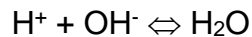
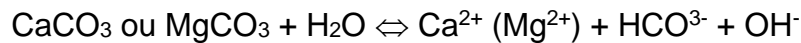
Fehr et al. (1971) considera os estádios fenológicos divididos em vegetativo e reprodutivo, sendo que o vegetativo se inicia na emergência das plântulas, quando as folhas cotiledonares estão abertas e em sequência seguem os estádios descritos de acordo com o número de nós que partem das folhas unifoliadas (V1, V2, V3, ..., Vn).

O estágio reprodutivo inicia-se quando há pelo menos uma flor aberta em qualquer ponto da haste principal a partir do terço médio superior. No total são oito estádios que podem ser divididos em quatro fases, florescimento (R1 e R2), desenvolvimento da vagem (R3 e R4), desenvolvimento das sementes ou grãos (R5 e R6) e maturação da planta (R7 e R8) (NOGUEIRA et al., 2009).

## 2.2. CALAGEM

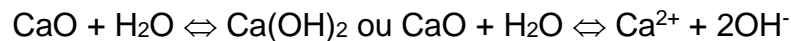
O método de aplicação e uso do calcário na agricultura é conhecido como calagem. Após sua reação no solo, o calcário libera íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) que tendem a interagir com a solução do solo, neutralizando íons  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$ , elevando o potencial hidrogeniônico (pH). Esse processo afeta diretamente a disponibilidade de nutrientes aos cultivos (HAVLIN et al. 2005).

O calcário também adiciona ao solo cálcio e magnésio, aumentando a saturação por bases (V%), e neutraliza o alumínio tóxico, promovendo balanço nutricional mais eficiente de acordo com os teores recomendados pela análise de solo (MALAVOLTA, 1967; RAIJ, 2011) Quando o  $\text{CaCO}_3$  ou  $\text{MgCO}_3$  é adicionado ao solo, ele reage de vários modos segundo as reações abaixo:



O que demonstra que o  $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$ ,  $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$  e  $\text{OH}^-(\text{aq})$  podem reagir com os íons  $\text{H}^+(\text{aq})$  e diminuir a sua acidez do solo ou da solução. O  $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$  neste sentido, atua como base fraca, cuja reação de formação do  $\text{OH}^-$  é relativamente lenta e parcial.

Quando se usa a cal virgem agrícola ( $\text{CaO}$ ) como corretivo da acidez, temos as seguintes reações:



Neste caso, o cal virgem possui caráter de base forte e a liberação de  $\text{OH}^-$  é imediata e total neutralizando com maior rapidez o  $\text{H}^+$  da solução do solo.

O processo e os benefícios da calagem podem expressar e feito residual, dependendo das propriedades físico-químicas do solo, definidas como poder tampão (LOPES et al., 1991).

O calcário, ao interagir com o solo, atua na dispersão da fração argila, ou seja, é um elemento que desagrega as partículas do solo. Quanto maior o teor de argila constituinte em um solo (partículas menores que 0,002 mm diâmetro, segundo

a escala de Atterberg, maior a dose de calcário necessária a ser aplicada e o efeito residual dessa calagem (RAIJ et al., 2011).

Solos mais intemperizados possuem altos teores de acidez trocável ( $H^+$  e  $Al^{3+}$ ), tendo o perfil mais profundo e normalmente apresentam altos teores da fração argila em sua estrutura. Além disso, são empobrecidos quanto a saturação por bases (V%) (LOPES et al. 1991; RAIJ, 2011).

O desenvolvimento de técnicas de produção e conservação dos solos demandaram o emprego de diferentes formas de aplicação de calcário. No sistema de plantio direto a quantidade de calcário aplicada deve ser parcelada em até três vezes a fim de evitar problemas na camada mais superficial do solo com excessiva saturação (CONTE et al., 2019), também recomendam que a dose anual não ultrapasse  $4,0 t ha^{-1}$ .

A necessidade de reaplicação do calcário pode ser percebida quando o pH estiver acima de 5,0 (em  $CaCl_2$ ) e/ou a saturação por alumínio (m%) for superior a 20%, ou segundo a análise dos atributos químicos do solo, quando os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) estiverem deficitários, abaixo do nível crítico para cada cultura (CONTE et al., 2019).

A observação da necessidade de amostragem em diferentes profundidades do perfil agricultável (0-10 e 10-20cm) é necessária, visto que o calcário normalmente no Sistema de Plantio Direto não é incorporado, e forma extratos no perfil de solo devido a sua dispersão a partir das camadas mais superficiais dependente da reatividade e interação com a água disponível no solo (CAIRES et al. 2005).

### 2.3. COBRE NO SOLO

Na crosta terrestre a concentração de Cu é de aproximadamente 60 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto que no solo a variação na sua concentração está associada ao uso, com valores variando de 5 a 30 mg kg<sup>-1</sup> em terras agricultáveis, de 200 a 500 mg kg<sup>-1</sup> nas áreas de cultivo de videira, devido à aplicação excessiva de fungicidas à base de Cu, e de 700 a 4000 mg kg<sup>-1</sup> próximo de áreas de mineração de cobre (ALLOWAY, 2013; PRINTZ et al., 2016).

A predominância dos minerais de cobre é na forma de sulfetos, em sua maioria no estado de oxidação +1, pois o Cu reduzido (Cu<sup>1+</sup>) forma forte ligação covalente com o ânion sulfeto (S<sup>2-</sup>). O Cu é mais abundante nas rochas basálticas que nas graníticas o que pode estar associado à maior ocorrência de sulfetos nas primeiras (McBRIDE, 1997).

Nas rochas carbonatadas observa-se uma tendência de exclusão, sendo as estruturas do metal com silicatos, óxidos e carbonatos menos estáveis quando comparadas às de sulfeto. Calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>) é o mineral de maior ocorrência na crosta seguido de calcocita (CuS<sub>2</sub>) e bornita (CuFeS<sub>4</sub>). Minerais secundários de Cu<sup>2+</sup> como óxidos, carbonatos, silicatos, sulfatos e cloretos podem ocorrer e são relativamente solúveis, mas não persistem sob condições propícias à lixiviação (McBRIDE, 1997).

Após exposição às condições na superfície da terra, o Cu<sup>1+</sup> e Cu<sup>0</sup> são oxidados ao estado de oxidação +2 (McBRIDE, 1997). Esta forma divalente (Cu<sup>2+</sup>) é a mais abundante no solo, principalmente como constituinte das estruturas cristalinas dos minerais primários e secundários (HAVLIN et al., 2005; MALAVOLTA, 2006).

O processo de redução da forma Cu<sup>2+</sup> para as formas Cu<sup>1+</sup> e Cu<sup>0</sup> pode ocorrer em condições de alagamento devido à formação de um ambiente redutor proporcionado pelas baixas concentrações de O<sub>2</sub>, pois essas formas reduzidas são termodinamicamente mais estáveis nessas condições (McBRIDE, 1997).

Além de presente na estrutura cristalina de minerais primários e secundários, o Cu está presente no solo em muitas outras formas. O solo é um sistema heterogêneo que consiste das fases sólida (material mineral e orgânico) e fluida (solução e ar) as quais interagem entre si, promovendo a degradação e

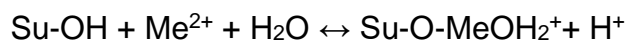
transferência de biomassa, assim como o meio nutritivo para as plantas ao disponibilizar os elementos essenciais. No solo, a disponibilidade de um nutriente para as plantas está na dependência de sua permanência na solução para que as raízes possam absorvê-lo (FAGERIA, 2009; MARSCHNER, 2012).

No entanto, processos chamados de retenção retiram os elementos da solução, onde estão disponíveis para as plantas, e passam para a fase sólida contígua. Esses processos podem ser de grande interesse não apenas agrônômico, mas também ambiental, principalmente em relação aos metais pesados como o chumbo (Pb), zinco (Zn), cádmio (Cd), Cu e outros que em quantidades relativamente pouco elevadas podem ter ação tóxica (BRADL, 2004).

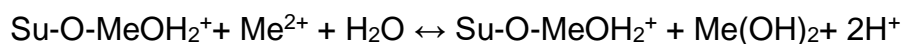
Dentre os mecanismos de retenção de um íon metálico, três processos se destacam: adsorção, precipitação e fixação. A adsorção é compreendida em termos de interações intermoleculares entre os solutos e a fase sólida (BRADL, 2004).

Estas interações no caso de metais pesados podem basicamente ser do tipo específica e menos reversíveis com formação de complexos de esfera interna entre o íon e um determinado grupo funcional da superfície da fase sólida, ou interações eletrostáticas onde o metal forma complexos do tipo esfera externa a uma certa distância da superfície e são mais fracas e reversíveis (BRADL, 2004).

As adsorções específicas se baseiam nas reações do íon com grupos hidroxila da superfície (Su) que são carregados negativamente em pH elevado pela doação de seu próton para a solução em troca do íon metálico (Me) como descrito a seguir:



Íons metálicos podem precipitar como óxidos, hidróxidos, carbonatos, sulfetos ou fosfatos e são dependentes tanto do pH como da concentração do íon presente na solução do solo. A precipitação pode ser descrita por duas reações, sendo que no início ocorre a formação do complexo do cátion metálico e a superfície seguido de sua precipitação:



A fixação ocorre quando os metais adsorvidos em minerais de argila e óxidos metálicos se difundem nas estruturas de rede desses minerais, permanecendo fixados nos espaços dos poros da estrutura mineral (difusão em estado sólido) e é necessária a dissolução total das partículas em que são incorporados para que os metais pesados sejam removidos (BRADL, 2004).

Em geral, o pH é o principal fator que governa a adsorção e disponibilidade de metais pesados como o níquel (Ni) e Cd, devido a alterações nas espécies metálicas em solução e à variação na intensidade da desprotonação da superfície do solo carregada eletricamente, com o número de cargas negativas aumentando com o pH. Portanto, a adsorção dos metais é pequena em valores de pH baixos e em valores elevados os íons metálicos são quase que totalmente retirados da solução do solo (BRADL, 2004).

No caso do Cu, devido à sua grande afinidade pela matéria orgânica, está desempenha papel fundamental na concentração do elemento na solução do solo, principalmente quando a matéria orgânica se encontra associada à fração argila do solo. Deste modo, sua retenção na fase sólida do solo está associada à presença desse tipo de material. (WU et al., 1999).

A ligação do íon  $\text{Cu}^{2+}$  com a matéria orgânica ocorre diretamente com dois ou mais grupos funcionais como os grupos carboxílico, carbonila e fenólico. A imobilização ocorre pela formação de um complexo rígido do tipo esfera interna (Figura 1). Outros metais como manganês (Mn), ferro (Fe) e cobalto (Co) formam com a matéria orgânica (MO) complexo de esfera externa. O  $\text{Cu}^{2+}$  é praticamente o único que apresenta a capacidade de formar complexos de esfera interna em condições de baixo valor de pH (McBRIDE, 1997).

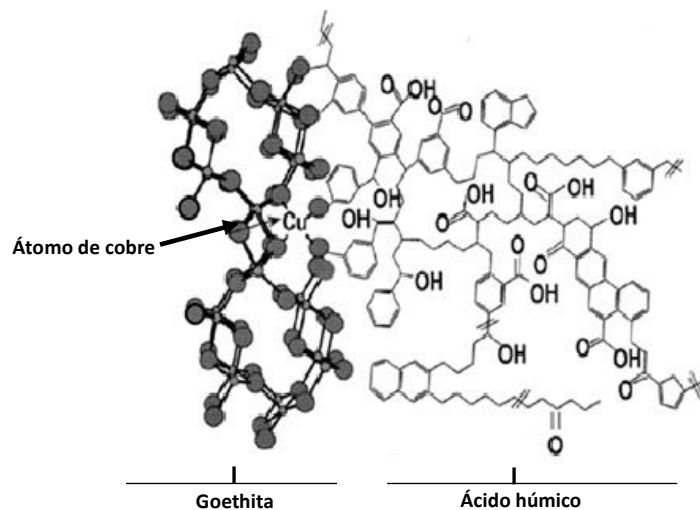
Com o  $\text{Cu}^{2+}$  pode-se observar uma ordem de preferência no processo de adsorção pelos componentes do solo que é maior com o óxido de manganês (MnO), seguido pela MO, óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) e minerais de argila (WU et al., 1999).

No entanto, o óxido de Mn e a MO do solo são os mais propensos a ligar o  $\text{Cu}^{2+}$  na forma não permutável, pois, quando adsorvido por minerais de argila e óxidos de ferro e alumínio, o Cu pode ser trocado por outros cátions e passar para a

fase solúvel, porém a ligação a óxido de manganês e matéria orgânica não permite essa troca (WU et al., 1999).

Na solução do solo a concentração do  $\text{Cu}^{2+}$  é muito baixa (0,01 – 0,06  $\mu\text{M}$ ) e ocorre na forma iônica ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ou complexada por agentes quelantes como ácidos orgânicos (cítrico, tartárico, málico, oxálico), metalóforos, fenóis e ácidos húmicos e fúlvicos (MALAVOLTA, 2006).

As formas mais facilmente absorvidas pelas plantas são  $\text{Cu}^{2+}$  e  $\text{Cu}$ -quelado, mas, além da persistência dessas formas na solução, devido à imobilidade do  $\text{Cu}$  no solo, a sua absorção pelas plantas depende da interceptação pelas raízes e, portanto, é necessário um bom desenvolvimento radicular que seja capaz de explorar mais amplamente o solo ao seu redor (HAVLIN et al., 2005).



**Figura 1.** Complexação de átomo de cobre (Cu) com matéria orgânica (ácido húmico) e mineral de óxido de ferro (Fe) (goethita) do tipo esfera interna (Modificado de ALCACIO et al., 2001).

Outro aspecto a ser observado na disponibilidade do  $\text{Cu}^{2+}$  para as plantas é a interação com outros elementos, principalmente com os nutrientes aplicados como fertilizantes. Altas doses de nitrogênio (N) causam sintomas de deficiência de  $\text{Cu}^{2+}$  devido ao estímulo do crescimento o que causa efeito de diluição da concentração, além disso, o excesso de N nas plantas reduz ainda mais a mobilidade do  $\text{Cu}^{2+}$  o que impede sua translocação para os pontos de crescimento. Altas concentrações de zinco ( $\text{Zn}^{2+}$ ),  $\text{Al}^{3+}$ , fósforo (P) e  $\text{Fe}^{2+}$  na solução do solo restringem a absorção de  $\text{Cu}^{2+}$  e podem levar à deficiência nos tecidos vegetais (HAVLIN et al., 2005; MALAVOLTA, 2006).

## 2.4 COBRE NA PLANTA

O papel do Cu como cofator de inúmeras proteínas é essencial para a vida não só das plantas, mas também de outros organismos como bactérias, fungos e mamíferos (WALKER; WEBB, 1981).

Nas condições fisiológicas encontradas nos tecidos vivos o Cu pode apresentar-se tanto na forma reduzida ( $\text{Cu}^{1+}$ ) como na oxidada ( $\text{Cu}^{2+}$ ) e cada uma dessas formas liga-se preferencialmente a determinado substrato. A forma reduzida tem afinidade por grupos de enxofre contendo tiol ou tioéster, apresentados pelos aminoácidos cisteína ou metionina, enquanto a forma oxidada liga-se a grupos de oxigênio ou de N imidazol, encontrados no ácido aspártico e glutâmico ou histidina (FESTA; THIELE, 2011).

A ação do Cu no desempenho das proteínas resulta de sua habilidade de alterar, de forma cíclica, do seu estado oxidado ( $\text{Cu}^{2+}$ ) para reduzido ( $\text{Cu}^{1+}$ ) o que é útil nos processos ativos de transporte de elétrons e reações redox que envolvem oxigênio, apresentados pela maior parte das enzimas dependentes de Cu (BURKHEAD et al., 2009).

O Cu passou a ser fundamental a partir do momento em que a atmosfera foi se tornando enriquecida em  $\text{O}_2$ , gerado pelos organismos fotossintetizantes, como as cianobactérias, promovendo um ambiente oxidante capaz de liberar o  $\text{Cu}^{1+}$  presente nos sais de sulfeto insolúveis o que levou à produção das formas solúveis ( $\text{Cu}^{2+}$ ) (BURKHEAD et al., 2009).

Processo inverso ocorreu com o  $\text{Fe}^{2+}$  nessa condição oxidante que se tornou menos disponível devido à formação de compostos insolúveis como óxidos de ferro. Assim, enzimas que anteriormente utilizavam o  $\text{Fe}^{2+}$ , prontamente disponível em uma biosfera anóxica, passaram progressivamente a substituí-lo pelo  $\text{Cu}^{2+}$ , que é capaz de desempenhar funções semelhantes. Isso explica por que muitas proteínas de  $\text{Cu}^{2+}$  têm uma contrapartida funcional que usa  $\text{Fe}^{2+}$  como cofator (BURKHEAD et al., 2009).

Além disso, com a utilização de recursos da bioinformática, comparando sequências de genomas, pôde-se revelar uma forte ligação entre a

utilização do  $\text{Cu}^{2+}$  em processos bioquímicos e a crescente presença do  $\text{O}_2$  na biosfera (RIDGE et al., 2008).

As plantas apresentam mais de 100 diferentes proteínas que contêm Cu, algumas associadas a processos essenciais para a vida como a fotossíntese e a respiração mitocondrial. Dentre essas, destacam-se a plastocianina, superóxido desmutase, citocromo oxidase, diamina oxidase e polifenol oxidase (MALAVOLTA, 2006; YURELA, 2009; MARSCHNER, 2012).

A plastocianina participa da cadeia de transporte de elétrons do fotossistema I (PS I) e contém apenas um átomo de Cu por molécula. (FAGERIA, 2009; HÄNSCH; MENDEL, 2009).

No entanto, cerca de 50% de todo o Cu presente na planta encontra-se no cloroplasto ligado a essa proteína, cuja proporção em relação ao número de clorofilas é de 3 a 4 moléculas da proteína para 1000 do pigmento. (FAGERIA, 2009; HÄNSCH; MENDEL, 2009).

Na deficiência de Cu ocorre a redução da concentração da plastocianina assim como da atividade do PS I (FAGERIA, 2009; HÄNSCH; MENDEL, 2009).

Há vários tipos de isoenzimas de superóxido dismutase (SOD) com a mesma função de desintoxicar o superóxido ( $\text{O}_2^-$ ) e podem utilizar metais como manganês (MnSOD), ferro (FeSOD) e cobre e zinco (CuZnSOD). A isoenzima de Cu e Zn apresenta um átomo de cada um desses metais que compartilham a ligação com o aminoácido histidina no sítio catalítico (BURKHEAD et al., 2009).

Na deficiência de Cu observa-se um declínio na atividade da CuZnSOD associado ao aumento da atividade das demais isoenzimas (MnSOD e FeSOD) (BURKHEAD et al., 2009).

A citocromo C oxidase é uma proteína codificada pelo genoma mitocondrial e a oxidase terminal da cadeia transportadora de elétrons que ocorre nessa organela, portanto é fundamental na respiração e geração de energia necessária para a manutenção dos processos metabólicos dos organismos aeróbicos. Seu funcionamento depende da inserção de três átomos de Cu, além de dois de Fe e um de Zn, magnésio (Mg) e sódio (Na) (CARR; WINGE, 2003).

Diamina oxidase e polifenol oxidase estão envolvidas na formação de lignina e localizam-se principalmente no apoplasma, incluindo epiderme e xilema de tecidos maduros. Diamina oxidase catalisa a degradação de poliaminas liberando  $H_2O_2$  que por sua vez sustenta a atividade de peroxidases necessárias na formação da lignina (WALTERS, 2003).

Já a polifenol oxidase catalisa a oxidação de compostos fenólicos originados da rota do chiquimato e que podem ser convertidos em metabólitos secundários no metabolismo do fenilpropanóide, produzindo, entre outros compostos, os principais blocos que formam a lignina (unidades de guaiacil, siringil e p-hidroxifenil) (PARVEEN et al., 2010).

A lacase, igualmente dependente do  $Cu^{2+}$ , é uma enzima vegetal que exerce um papel crucial e não redundante às peroxidases na síntese de lignina, pois participam na polimerização desta (ZHAO et al., 2013)

Existem ainda outros processos de grande importância para o crescimento e desenvolvimento da planta que também necessitam da presença de Cu como a formação de pólen, fertilização, nodulação e fixação simbiótica do N atmosférico, pois, na deficiência desse micronutriente, os efeitos deletérios na fotossíntese resultam na diminuição da eficiência da fixação de  $CO_2$  e, portanto, numa menor concentração de carboidratos que são essenciais para que esses processos ocorram de forma adequada (FAGERIA, 2009; MARSCHNER 2012).

Embora o Cu seja essencial para o desenvolvimento e crescimento das plantas (MALAVOLTA, 2006), o seu excesso pode ser tóxico uma vez que o ciclo redox entre o  $Cu^{1+}$  e o  $Cu^{2+}$  também catalisa a produção de radicais hidroxila ( $OH\cdot$ ) (Andrés-Colás, et al., 2013). O radical  $OH\cdot$  é uma molécula neutra, diferente do íon hidroxila ( $OH^-$ ) que apresenta carga negativa, e é altamente tóxica, pois são muito instáveis, ou seja, possuem vida curta, exatamente porque apresentam valências livres e os elétrons procuram sempre se agrupar em pares, tanto nos orbitais dos átomos quanto nas ligações covalentes.

Assim, os elétrons desemparelhados dos radicais reagem ativamente com qualquer molécula próxima, formando novos compostos e provocando danos às membranas celulares e macromoléculas vitais como o DNA e proteínas (RODRIGO-MORENO et al., 2013).

A produção de  $\text{OH}\cdot$  ocorre em uma reação denominada de Cupro-Fenton entre o  $\text{Cu}^{1+}$  e o peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), este último produzido no metabolismo do  $\text{O}_2$  ( $\text{Cu}^{1+} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Cu}^{2+} + \text{OH}\cdot + \text{H}_2\text{O}$ ) (Rodrigo-Moreno et al., 2013).

Na presença de excesso de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , o radical  $\text{OH}\cdot$  produzido da oxidação de  $\text{Cu}^{1+}$  é consumido por outra molécula de  $\text{H}_2\text{O}_2$  para produzir  $\text{HOO}\cdot$  e  $\text{O}^{2-\cdot}$  ( $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH}\cdot \rightarrow \text{HOO}\cdot + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{O}^{2-\cdot} + \text{H}^+$ ), igualmente tóxicos às células quando gerados em grandes quantidades (LIU et al., 2005).

Em condições adequadas de concentração de Cu no tecido vegetal, uma moderada formação de  $\text{OH}\cdot$  promove a ligação deste a canais catiônicos não seletivos presentes na membrana plasmática, que podem ativar o influxo de  $\text{Ca}^{2+}$ . Tal fato promoveria o crescimento das raízes e, portanto, o aumento da área de prospecção radicular para aquisição de minerais (RODRIGO-MORENO et al., 2013).

Na disponibilidade excessiva de Cu ocorre a entrada maciça de  $\text{Cu}^{1+}$  o que gera uma explosão de  $\text{OH}\cdot$  que, além de provocar danos às moléculas vitais como já explicado, pode causar a ativação dos canais de influxo de  $\text{Ca}^{2+}$  de um lado da membrana e a abertura dos canais e efluxo de  $\text{K}^+$  do outro lado, ativando uma morte celular programada (programmed cell death, PCD) conduzida por caspases (proteínas chamadas de efetoras no processo de PCD) e inibindo o alongamento da raiz (RODRIGO-MORENO et al., 2013).

O impedimento ao alongamento radicular pode também ser induzido no excesso de Cu pela restrição à redistribuição de auxinas através da interação com Pinformed1 (PIN1), um transportador de auxina responsável pelo fluxo acrópeto de auxina, ou seja, do ápice para o córtex radicular (YUAN et al., 2013).

O Cu em excesso reage facilmente com grupos tióis e pode deslocar outros metais essenciais em proteínas o que impede a função destas. Por outro lado, em situação de escassez as plantas podem alterar seu metabolismo direcionando a atuação do Cu para as enzimas chaves que garantam a sobrevivência do organismo (MALAVOLTA, 2006; MARSCHNER, 2012).

Em resposta a essas situações de escassez ou excesso de Cu as plantas apresentam uma estreita regulação de sua homeostase com a ação de inúmeras enzimas que trabalham de forma coordenada desde a absorção do metal,

imobilização e distribuição para as organelas e proteínas alvo (MALAVOLTA, 2006; MARSCHNER, 2012).

O mecanismo de absorção do Cu presente na solução do solo pelas raízes das plantas ainda não está totalmente elucidado. Embora as formas mais abundantes do Cu solúvel ( $\text{Cu}^{2+}$  e quelados) consigam penetrar no apoplasto das raízes das plantas, estudos recentes relatam a ocorrência de mecanismos específicos para a passagem do metal através da membrana plasmática que apresentam um padrão semelhante ao da absorção do  $\text{Fe}^{3+}$  altamente insolúvel (RYAN et al., 2013).

No caso do Fe, observam-se dois grupos de plantas distintos: as plantas de estratégia I (dicotiledôneas e monocotiledôneas não gramináceas) que provocam a acidificação da rizosfera levando à dissolução dos óxidos de Fe e Al e à *up* regulação das Fe redutases, as quais reduzem  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$ , enquanto as plantas de estratégia II (monocotiledôneas gramináceas) complexam o  $\text{Fe}^{3+}$  pela liberação de exudados de alta afinidade, os fitosideróforos (MARSCHNER; ROMHELD, 1994, ROBINSON, et al., 1999).

Para o Cu, verificam-se os mesmos dois grupos de plantas. Nas plantas da estratégia I a redução do  $\text{Cu}^{2+}$  para  $\text{Cu}^{1+}$  ocorre no apoplasto pela ação das Fe redutase FRO4 e FRO5 presentes na membrana plasmática (BERNAL et al., 2012).

Após a redução a proteína transportadora de Cu COPT1, que apresenta alta afinidade ao  $\text{Cu}^{1+}$ , facilita a passagem do metal através da membrana plasmática para o interior da célula vegetal. No citoplasma o  $\text{Cu}^{1+}$  pode ligar-se a grupos de enxofre, evitando o excesso que levaria à toxidez, ou ser novamente oxidado para  $\text{Cu}^{2+}$  e passar para o xilema como cátion ou associado à nicotianamina (Figura 2a) (RYAN et al., 2013).

Nesse grupo de plantas observa-se fracionamento dos isótopos estáveis de Cu ( $^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}$ ) com notável enriquecimento do isótopo mais leve ( $^{63}\text{Cu}$ ) nos tecidos vegetais, o que, provavelmente, decorre do processo redox que dirige a absorção do micronutriente na planta (NAVARRETE et al., 2011; RYAN et al., 2013).

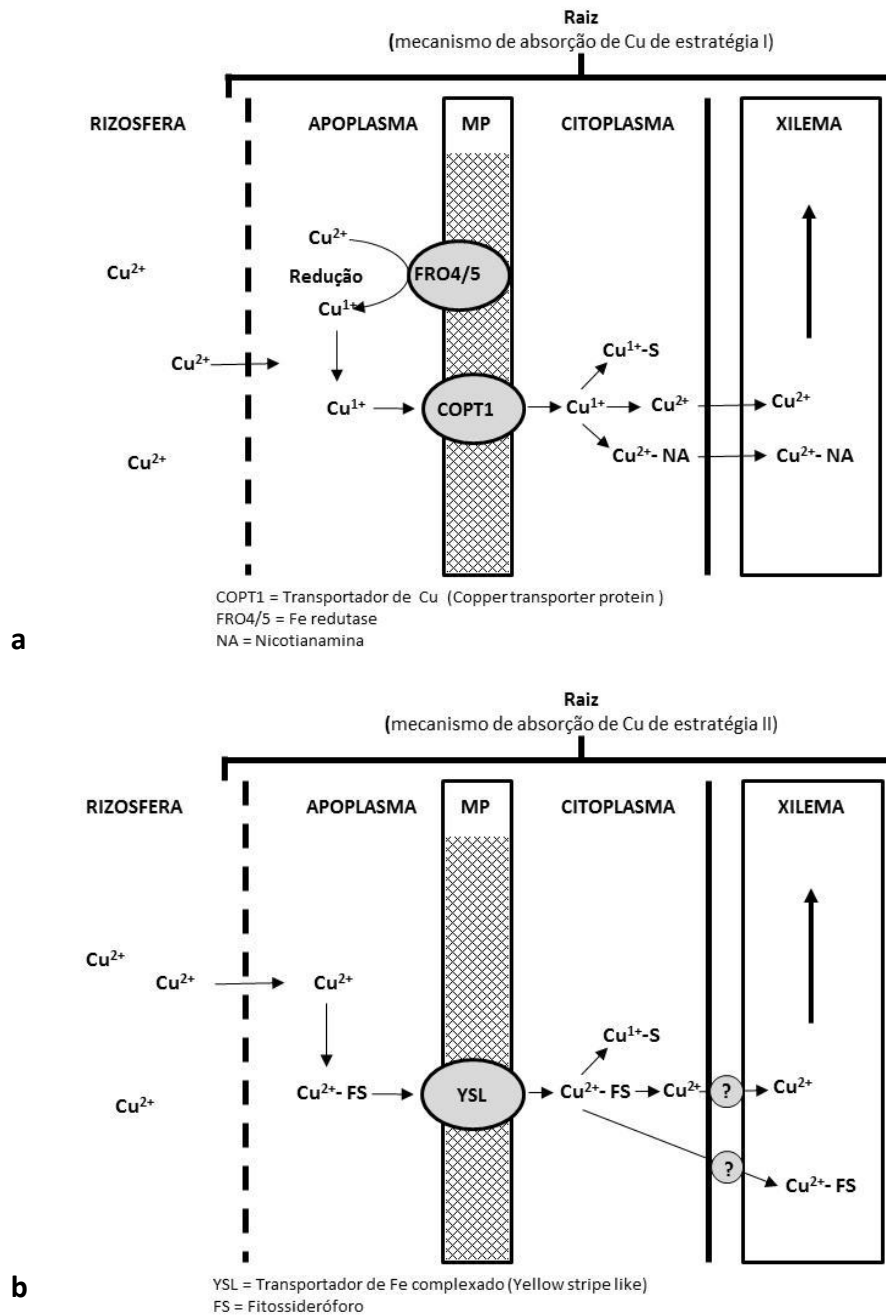
A absorção do Cu nas plantas de estratégia II não depende de reações redox, nesse caso o mecanismo utilizado é o da complexação do micronutriente na forma oxidada com fitosideróforos. No modelo proposto, a

absorção do complexo  $\text{Cu}^{2+}$ -fitossideróforo através membrana plasmática ocorreria com o auxílio da proteína transportadora de membrana YSL (yellow-stripe-like) sem indução de fracionamento isotópico (RYAN et al., 2013).

Na deficiência de Fe, a produção de fitossideróforos é aumentada, uma vez que esse é um mecanismo predominantemente associado à absorção de Fe, concluindo-se que o aumento na absorção de Cu frequentemente observado nessas condições pode resultar do aumento da formação do complexo  $\text{Cu}^{2+}$ -fitossideróforo. No citoplasma pode ocorrer a redução para  $\text{Cu}^{1+}$  e imediata ligação com grupos de enxofre de modo similar ao que ocorre com as plantas de estratégia I (Figura 2b) (RYAN et al., 2013).

Após ultrapassarem a barreira da membrana plasmática os íons de Cu em excesso são retirados do citosol, onde apenas pequenas quantidades são toleradas, pela ação de um eficiente mecanismo de entrega para os locais de utilização (mitocôndrias, cloroplastos, aparelho de Golgi) e proteínas dependentes do Cu (MIGOCKA; MALAS, 2018).

Esse mecanismo depende da atividade de proteínas citoplasmáticas específicas, solúveis e de baixo peso molecular denominadas Cu-chaperonas, constituindo uma estratégia fundamental na prevenção de interações inapropriadas do elemento com outros componentes celulares. A ação dessas proteínas difere de outros tipos de chaperonas geralmente envolvidas no auxílio ao dobramento adequado das proteínas (MIGOCKA; MALAS, 2018).



**Figura 2.** Modelo de mecanismo de absorção do Cu para (a) plantas de estratégia I e (b) plantas de estratégia II (Adaptado de RYAN et al., 2013).

Embora a maioria dos solos não apresente níveis elevados de Cu que possibilitem a absorção excessiva, resultando em toxidez aos tecidos vegetais, as plantas apresentam distintas estratégias que controlam a quantidade desses íons (PRINTZ et al., 2016).

Entre essas estratégias observa-se a redução do sistema de absorção, sequestro nos vacúolos e o efluxo através da membrana plasmática com acúmulo do

íon no apoplasma. Chaperonas específicas também atuam na entrega do Cu às proteínas transportadoras que permitem a passagem tanto para o interior do vacúolo, mediada pela proteína denominada Heavy metal ATPase (HMA) (DEL POZO et al., 2010), como para fora da célula, mediada por uma proteína do tipo antiporter com o efluxo de  $\text{Cu}^{2+}$  sendo compensado pelo influxo de  $\text{H}^+$  (PARROTTA et al., 2015).

Sintomas de toxidez variam muito entre espécies de plantas e tipo de tecido vegetal (Malavolta, 2006). De uma maneira geral, observa-se a redução da biomassa da planta como um todo e em especial das raízes devido ao acúmulo preferencial apresentado pela maioria das espécies, clorose do tecido vegetativo e, nos cloroplastos, danos nas membranas dos tilacóides associadas ao fotossistema II além de redução da absorção de Fe (BURKHEAD, 2009; MARSCHNER, 2012).

As Cu-chaperonas também desempenham papel fundamental em condições de deficiência de Cu, pois as plantas podem ajustar o metabolismo em situação de escassez, priorizando as funções mais essenciais para a sobrevivência e inibindo processos de menor importância ou promovendo a síntese de proteínas capazes de desempenhar funções similares às cuproproteínas como no exemplo da expressão da enzima superóxido desmutase (SOD) com acúmulo de FeSOD ou MnSOD em detrimento da Cu/ZnSOD (BURKHEAD et al., 2009; PRINTZ et al., 2016).

Este processo que aciona um modo de economia do Cu é mediado por Cu-microRNAs, cuja síntese é ativada pelo fator de transcrição responsivo ao Cu SPL7 que também ativa a expressão de genes envolvidos na assimilação do Cu (BURKHEAD et al., 2009; PRINTZ et al., 2016).

Os principais sintomas de deficiência de Cu apresentado pelas plantas incluem redução na taxa de crescimento, clorose das folhas mais jovens, enrugamento da margem das folhas e danos no meristema apical. Como efeito secundário observa-se redução na taxa transpiratória devido a depósitos insuficientes de lignina nas células dos vasos condutores do xilema (MALAVOLTA, 2006; FAGERIA, 2009; MARSCHNER, 2012).

A deficiência causa ainda danos ao desenvolvimento e viabilidade do grão de pólen, produção de frutos e sementes, desenvolvimento do embrião e viabilidade das sementes (MALAVOLTA, 2006; FAGERIA, 2009; MARSCHNER, 2012).

Muito se tem evoluído no conhecimento da maquinaria envolvida no controle da homeostase do Cu nos tecidos vegetais com identificação de interações de proteínas específicas e de um sofisticado sistema regulatório que envolve, além do fator de transcrição SPL, microRNAs (BURKHEAD, 2009).

No entanto, muitas lacunas ainda estão por serem esclarecidas que incluem como exatamente ocorre a regulação dos microRNAs, bem como um limitado entendimento do mecanismo molecular pelo qual o Cu é distinguido dos demais íons absorvidos pela planta (BURKHEAD, 2009).

Além disso, embora existam muitas enzimas dependentes de Cu com função biológica bem definida (plastocianina, citocromo c oxidase e superóxido desmutase) existe uma série de cuproproteínas cujo papel ainda não foi esclarecido (BURKHEAD, 2009).

## 2.5 INTERAÇÃO CÁLCIO E COBRE (CA VS CU)

Na solução do solo, a concentração dos nutrientes pode ser aumentada, diminuída, ou não ser influenciada pela presença de outro elemento (MALAVOLTA et al. 1997).

No efeito antagônico descrito por Malavolta (2006), o mais comum é o a interação negativa Ca e Cu, uns dos motivos se deve ao fato que o íon  $\text{Ca}^{2+}$  apresenta maior raio iônico (1,2-1,1 Å) do que o cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ) (0,8 Å), no entanto, tem menor eletronegatividade (1,0 e 2,0 kcal  $\text{g}^{-1}$  de átomo), potencial iônico (1,8 e 2,5 carga/raio) e semelhantes graus de hidratação (6,0 Å) (KABATA-PENDIAS, 2000), o que pode interferir significativamente na sua eficiência de utilização e absorção.

Segundo Malavolta et al. (1997) e Malavolta (2006), o  $\text{Ca}^{2+}$  exerce efeito antagônico com o  $\text{Cu}^{2+}$ , ou seja, a presença de um elemento pode diminuir a absorção de outro. Esse processo de toxidez pela carência de um elemento 'M' pode ser evitada ou a deficiência ser agravada, dependendo da concentração de um dos elementos na solução.

Além disso, o excesso de Ca na solução produz a 'clorose férrica', podendo também induzir as deficiências de zinco (Zn) e Cu na planta (FAGERIA, 2009; MARSCHNER, 2012).

Além do Cu, outro problema no uso da calagem é utilização contínua de calcário que pode carrear em deficiência de outros micronutrientes, como o Mn e Zn (MALAVOLTA et al., 1997).

### **3. HIPÓTESES**

- 3.1** Solos com maior teor de argila a aplicação e altas dose de calcário diminui a eficiência de uso de cobre;
- 3.2** Existe interação calagem e doses de cobre, independentemente do tipo de solo;
- 3.3** A aplicação e calcário é mais eficiente no aumento da produtividade de grãos de soja.

## **4. OBJETIVOS**

- 4.1** Comprovar as hipóteses;
- 4.2** Quais os componentes de produção e fisiológicos são mais influenciados pelos tratamentos;
- 4.3** Definir a(s) dose(s) de Cu para experimento realizado em condições de casa de vegetação em solos com diferentes níveis de acidez e teor de argila;
- 4.4** Verificar o incremento na produtividade com aplicação de calcário.

## 5 CAPÍTULO 1

### 5.1 INTERAÇÃO CALCÁRIO E COBRE NA PRODUÇÃO, FERTILIDADE DO SOLO E ESTADO NUTRICIONAL DA SOJA

#### 5.1.1 Resumo

A aplicação de elevadas doses de calcário em superfície no Sistema Plantio Direto pode estar agravando o efeito antagônico entre o cálcio (Ca) e cobre (Cu) na absorção deste último pelas plantas. Um experimento em casa de vegetação foi conduzido com dois solos com diferentes teores de argila para avaliar o efeito da calagem na fertilização com Cu. Os tratamentos consistiram de duas doses de calcário (0 e 5,0 t ha<sup>-1</sup>) e cinco doses de Cu (0, 2, 4, 8 e 16 mg kg<sup>-1</sup>). Independentemente do tipo de solo, a aplicação de calcário e Cu não apresentaram interação na produção e grãos (PG), porém, acarretaram em incremento na PG, produção de matéria seca da parte aérea (MSPA), número de grãos por vagem, número de vagens por vaso, peso de vagens por vaso, peso de 100 sementes, volume de raízes, taxa fotossintética, clorofila e os teores Ca, Mg e Cu no solo e nas folhas. Conclui-se que a soja cultivada em Neossolo e Latossolo, a utilização de calcário dolomítico e aplicação de Cu não se interagem, porém, isoladamente mostraram efetivo no aumento da produtividade da soja.

**Keywords:** Atributos Químicos do Solo, Componentes de Produção, Estado Nutricional, *Glycine max*.

### 5.1.2 Introdução

O cobre (Cu) desempenha importantes funções nas plantas, destacando-se a participação no fluxo de elétrons na fase luminosa da fotossíntese e na fase escura auxiliando a entrada do CO<sub>2</sub> em compostos orgânicos (MALAVOLTA, 2006; MIGOCKA; MALAS, 2018).

As plantas apresentam mais de 100 diferentes proteínas que contêm Cu, dentre essas, destacam-se a plastocianina, superóxido desmutase, citocromo oxidase, diamina oxidase e polifenol oxidase (YURELA, 2005; MARSCHNER, 2012).

Com a aplicação de calcário sem o revolvimento do solo está havendo um acúmulo de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na camada superficial e consequente diminuição acentuada da acidez do solo induzindo deficiência de nutrientes (MOREIRA et al. 2017), entre eles, o Cu.

A elevação do pH reduz a solubilidade e aumenta a força pela qual o Cu está preso às argilas e a matéria orgânica do solo (MOS), tornando-o menos disponível (WU et al. 1999).

Aliado a isso, a adubação com este nutriente não está sendo feita e com a exportação para os grãos o teor do Cu disponível no solo vem diminuindo gradativamente (MOREIRA; MORAES, 2019), sendo os sintomas de deficiência do nutriente reportado em diferentes culturas e locais (FAGERIA et al., 2015; MOREIRA et al., 2019).

Para agravar este problema, também existem os efeitos interiônicos antagônicos, cujo aumento da concentração de Ca<sup>2+</sup> na solução do solo decorrente de doses elevadas de calcário impede a absorção do íon Cu pelas plantas (MALAVOLTA et al. 1997; MARSCHNER, 2012).

Na soja (*Glycine max* (L.) Merrill), independentemente do teor de argila e matéria orgânica, solos com baixo teor do Cu e níveis adequados de Ca apresentaram aumento significativo na produção de grãos com incremento das doses de Cu (MOREIRA et al., 2019. MOREIRA et al., 2019).

Além disso, em condições adequadas de concentração de Cu no tecido vegetal, uma moderada formação de OH<sup>-</sup> promove a ligação deste a canais

catiônicos não seletivos presentes na membrana plasmática, que podem ativar o influxo de  $\text{Ca}^{2+}$ , o que promoveria o crescimento das raízes e, portanto, o aumento da área de prospecção radicular para aquisição de minerais (RODRIGO-MORENO et al., 2013).

O objetivo deste trabalho é verificar a presença de interação da aplicação de calcário e doses de Cu na produção, componentes fisiológicos e de produção, fertilidade e estado nutricional das plantas de soja cultivada em solos com diferentes teores de argila.

### 5.1.3 Material e Métodos

#### 5.1.3.1 Local e característica do solo

O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação na Embrapa Soja, Londrina (23°19'08" LS e 51°11'37" LO), Estado do Paraná, Brasil.

Os solos utilizados foram um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) coletado na camada de 0-20 cm no município de Mauá da Serra, Estado do Paraná e um Neossolo Quartzarênico (NQ) coletado no município de Osvaldo Cruz, Estado de São Paulo com os seguintes atributos químicos e físicos (EMBRAPA, 1997):

- a) LVd - pH em  $\text{CaCl}_2$  = 4,6, matéria orgânica do solo (MOS) = 45,6 g  $\text{kg}^{-1}$ , fósforo (P - Mehlich 1) = 2,4 mg  $\text{kg}^{-1}$ , potássio ( $\text{K}^+$ ) = 0,4  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) = 3,0  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) = 1,5  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , enxofre (S- $\text{SO}_4^{2-}$ ) = 15,8 mg  $\text{kg}^{-1}$ , alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) = 0,2  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , acidez potencial (H+Al) = 8,1  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , capacidade de troca de cátions (CTC) = 13,0  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , boro (B) = 0,5 mg  $\text{kg}^{-1}$ , Cu = 2,1 mg  $\text{kg}^{-1}$ , ferro (Fe) = 65,7 mg  $\text{kg}^{-1}$ , manganês (Mn) = 48,7 mg  $\text{kg}^{-1}$ , zinco (Zn) = 1,5 mg  $\text{kg}^{-1}$ , argila 630 g  $\text{kg}^{-1}$  e areia 210 g  $\text{kg}^{-1}$  e
- b) NQ - pH em  $\text{CaCl}_2$  = 4,6, MOS = 45,5 g  $\text{kg}^{-1}$ , P = 1,6 mg  $\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{K}^+$  = 0,1  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  = 1,1  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  = 0,3  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , S- $\text{SO}_4^{2-}$  = 2,0 mg  $\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  = 0,0  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , H+Al = 2,0  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , CTC = 3,4  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , B = 0,2 mg  $\text{kg}^{-1}$ , Cu = 1,4 mg  $\text{kg}^{-1}$ , Fe = 12,1 mg  $\text{kg}^{-1}$ , Mn = 25,9 mg  $\text{kg}^{-1}$ , zinco (Zn) = 0,7 mg  $\text{kg}^{-1}$ , argila 59 g  $\text{kg}^{-1}$  e

areia 915 g kg<sup>-1</sup>.

### 5.1.3.2 Delineamento estatístico, adubação e plantio

Os tratamentos foram dispostos em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial com parcela subdividida com as doses de Cu e calcário e a subparcela os dois tipos de solos (Latossolo e Neossolo) com quatro repetições. Os tratamentos consistiram de duas doses de calcário [0 e 5,0 Mg ha<sup>-1</sup>, (28% de CaO e 18% de MgO, p:p)] e cinco doses de Cu (0, 2, 4, 8 e 16 mg kg<sup>-1</sup>). O experimento foi conduzido em vasos de barro de 3,0 dm<sup>3</sup> de solo seco ao ar (TFSA) passado em peneira de 2,0 mm.

As sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium elkanii* + *B. japonicum* – SEMIA 587 e SEMIA 5019). As adubações com P, K, B, S, Co, Fe, Mn, Mo, Ni e Zn foram feitas de acordo com Moreira et al. (2011) adaptadas de Allen et al. (1976) para experimentos conduzidos em condições de casa de vegetação [150 mg kg<sup>-1</sup> de P -fosfato monoamônio (MAP), 0,5 mg kg<sup>-1</sup> de B (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>), 0,1 mg kg<sup>-1</sup> de molibdênio - Mo (Na<sub>2</sub>Mo<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), 2,5 mg kg<sup>-1</sup> de Fe (FeSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), 0,01 mg kg<sup>-1</sup> de cobalto - Co (CoCl<sub>2</sub>), 0,01 mg kg<sup>-1</sup> de níquel - Ni (NiSO<sub>4</sub>.6H<sub>2</sub>O), 5,0 mg kg<sup>-1</sup> de Mn (MnSO<sub>4</sub>.3H<sub>2</sub>O) e 5,0 mg kg<sup>-1</sup> de Zn (ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O)].

Nos estádios V2 e V4 foram feitas as adubações de cobertura com 100 mg kg<sup>-1</sup> de K (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Os vasos foram irrigados diariamente com água desionizada para compensar as perdas por evapotranspiração e para manter o solo próximo de 70% do valor total de poros (CASSEL; NIELSEN, 1986).

A cultivar de soja utilizada foi a M5947 IPRO de ciclo indeterminado e foram semeadas dez sementes, e após o desbaste deixadas três plantas uniformes por vaso.

### 5.1.3.3 Colheita e análises laboratoriais

No estádio R2 (FEHR et al.; 1971), no período da manhã foi determinada no terceiro e quarto folíolos a contar do ápice, a taxa fotossintética,  $A$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), condutância estomática,  $g_s$  ( $\text{mol H}_2\text{O M}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), transpiração,  $Tr$  ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), concentração interna de  $\text{CO}_2$ ,  $C_i$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ) com o medidor de fotossíntese (LI-6400XT LICOR®) e calculada a eficiência do uso de água,  $\text{EUH}_2\text{O} = A/Tr$  ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

Nos mesmos folíolos foi determinada a unidade SPAD, sendo os valores convertidos em teor de clorofila ( $\text{mg cm}^{-2}$ ) pela equação  $\hat{y} = 16,033 + (7,5774 \times \text{SPAD})$  (FRITSCHI; RAY, 2007).

Após as leituras, esses folíolos foram coletados e secos em estufa de circulação forçada a  $60 \pm 3^\circ\text{C}$  e utilizados para determinação dos teores totais de Ca, Mg e Cu (MALAVOLTA et al., 1997).

Durante todo ciclo vegetativo foram coletadas as folhas senescente para obtenção da produção de matéria seca total da parte aérea da planta (MSPA).

No final do ciclo também foram quantificadas a produção de grãos (PG), número de vagens por vaso (NVV), número de grãos por vagem (NGV), número de vagens por planta (PVV), peso de 100 sementes e volume de raízes (VR).

Após a colheita, foram retiradas amostras de solo de cada vaso para determinação do pH ( $\text{CaCl}_2$ ),  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , acidez potencial (H+Al) e Cu disponível, conforme metodologias descritas pela Embrapa (1997).

### 5.1.3.4 Análise estatística

Os resultados dos componentes de produção e fisiológicos, atributos químicos do solo e estado nutricional das plantas foram submetidos aos testes de normalidade (SHAPIRO; WILK 1965), e posteriormente realizadas a análise de variância (ANOVA), teste F e comparação de contraste entre médias pelo teste de Tukey a 5% de significância.

#### 5.1.4 Resultados e Discussão

Independentemente do tipo de solo, a interação calcário e doses de Cu não foi significativa na produção de grãos (PG), havendo efeito isolado das aplicações de calcário e das doses de Cu (Figura 3).

Os dois tipos de solos apresentaram diferenças significativas nos componentes de produção e verificou-se que a PG, massa seca da parte área, (MSPA), número de vagens por vaso (NVV), número de vagens por planta (NVP), peso de 100 sementes e volume de raízes aumentaram de forma significativa com aplicação de calcário (Tabela 1).

Na média dos dois solos (Latossolo e Neossolo), a produção de MSPA aumentou 30,1%, o NVV o aumento foi de 47,9%, o NVP foi de 55,0%, o peso de 100 sementes de 20,6% e o VR de 28,3% com aplicação de 5 t ha<sup>-1</sup> de calcário (Tabela 1).

Com relação as doses de Cu, exceto no peso de 100 sementes na soja cultivada no Latossolo, o incremento apresentou efeito foi quadrático com os maiores valores na faixa de 4 a 8 mg kg<sup>-1</sup> de Cu aplicado.

A maior PG foi obtida no Latossolo em comparação ao Neossolo corrobora os resultados de Fageria et al. (2010), ao relatarem que o maior teor de argila é um dos principais fatores que determinam a taxa de eficiência agrônômica e de utilização do calcário na produção. Moreira et al. (2017) também obtiveram incremento significativo da PG de 15 cultivares de soja com a aplicação de calcário.

Nos dois solos o incremento na PG foi significativamente relacionado com a produção de MSPA (Latossolo -  $\hat{y} = 5,964 + 1,823x$ ,  $r = 0,83$ , Neossolo -  $\hat{y} = 33,291 + 2,851x$ ,  $r = 0,75$ , dois solos -  $\hat{y} = 8,917 + 1,640x$ ,  $r = 0,74$ ,  $p \leq 0,05$ ) e com NVP (Latossolo -  $\hat{y} = 0,652 + 0,8841x$ ,  $r = 0,86$ , Neossolo -  $\hat{y} = 0,652 + 0,846x$ ,  $r = 0,59$ , dois solos -  $\hat{y} = 0,692 + 0,841x$ ,  $r = 0,86$ ,  $p \leq 0,05$ ), ou seja, as equações mostraram relação direta da MSPA e NVP sobre a PG e demonstra que a utilização desses componentes pode ser uma ferramenta para antever com segurança a produtividade da cultura (FAGERIA, 2009; FAGERIA et al. 2010).

Sabe-se que as características fisiológicas e morfológicas das plantas desempenham na determinação dos rendimentos (FAGERIA, 2009; FAGERIA et al.

2010) e confirma os resultados obtidos por Fageria et al. (1997), ao relatarem que a determinação da produção de MSPA e a quantificação do NVP antes da colheita podem ser utilizadas como critério, principalmente devido às altas correlações com a PG.

O VR aumentou significativamente com aplicação de calcário e não houve efeito das doses de Cu nos dois tipos de solo, sendo que o Latossolo foi, na média dos tratamentos, 27,2% superior ao Neossolo (Tabela 1).

O sistema radicular apresenta baixo desenvolvimento e volume em solos muito ácidos e entre os principais fatores de acidez, a toxicidade de Al trocável e as deficiências de Ca e Mg têm sido apontadas como os fatores mais consideráveis na restrição do crescimento radicular (CAIRES; ROSOLEM, 1998).

A correlação do teor de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  com o volume de raízes foram altas (Ca,  $\hat{y} = 5,400 + 5,386x$ ,  $r = 0,86$  e Mg,  $\hat{y} = 18,300 + 2,892x$ ,  $r = 0,81$ ,  $p \leq 0,05$ ). Assim, a determinação do teor de Ca e Mg trocável no solo pode ser suficiente para um diagnóstico do potencial de crescimento radicular da soja.

A PG apresentou resposta quadrática à aplicação de doses de Cu (Figura 1). No Latossolo e Neossolo, na ausência de calagem as maiores produções estimadas (MPE) foram conseguidas com 9,5 e 14,7  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cu, enquanto na presença da calagem foram de 9,1 e 10,3  $\text{mg kg}^{-1}$ , respectivamente, ou seja, em solos com menor teor de argila, mesmo com PG inferiores é necessário maior quantidade de Cu aplicada, independentemente da aplicação de calcário, para se obter a MPE.

A calagem proporcionou aumento significativo no pH e nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , bem como redução nos teores de H+Al no solo (Tabela 2).

Moreira e Fageria (2010) e Castro e Crusciol (2013) obtiveram resultados semelhantes, enquanto que Havlin et al. (2005) explicam que o calcário quando entra em contato com a umidade do solo ocorre uma reação com o  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$ , o que acarreta em aumento dos níveis de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , dissociação dos grupos hidroxílicos ( $\text{OH}^-$ ) e redução do íon  $\text{H}^+$  na solução do solo e conseqüente elevação do pH. Com relação ao Cu disponível, nos dois solos (Latossolo e Neossolo) e na ausência e presença de calagem houve efeito linear positivo e significativo com o incremento das doses de Cu.

Moreira et al. (2019) avaliando a eficiência de utilização de Cu por diferentes cultivares de soja, também obtiveram resultados semelhantes no aumento do Cu disponível no solo.

Os teores foliares de Ca e Mg não foram influenciados pelas doses de Cu e não apresentaram interação significativa da calagem e doses de Cu (Tabela 3).

Na ausência de calagem, os teores de Ca variaram de 1,9 a 3,2 g kg<sup>-1</sup> e teor médio de 2,6 g kg<sup>-1</sup> e com calagem foi de 3,5 a 5,5 g kg<sup>-1</sup> e teor médio de 4,4 g kg<sup>-1</sup>, enquanto o Mg variou de 0,6 a 1,0 g kg<sup>-1</sup> sem calcário e de 3,1 a 9,1 g kg<sup>-1</sup> com calcário.

Os teores de Ca e Mg nos tratamento com calagem pode ser considerados adequados (MALAVOLTA et al. 1997; URANO et al., 2006) e estão próximos dos obtidos por Moreira et al. (2017) com 15 cultivares de soja.

Para o teor de Cu, na média dos dois solos e das doses de Cu, houve redução de 23,9% com aplicação de calcário (Tabela 3).

Resultado semelhante foi obtido por Moreira et al. (2017), ao verificarem redução média de 45,6% com incremento da dose de 1,5 a 2,7 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário aplicada.

Österás e Greger (2006) relataram que o aumento da adição de Ca na solução nutritiva diminuiu a absorção, translocação e acúmulo de Cu na planta, possivelmente por competirem pelo mesmo sítio de absorção (KAWASAKI; MORITSUGU. 1987).

A interação Ca x Cu também foi descrita por Hippler et al. (2018) ao relatarem que o estresse oxidativo devido ao excesso de Cu é reduzido com o aumento do suprimento de Ca na solução.

O Cu participa de várias reações na fotossíntese e a deficiência ou excesso do nutriente pode reduzir o crescimento e a produtividade de grãos de soja (MOREIRA et al. 2019).

Exceto a eficiência do uso de água (EUH<sub>2</sub>O), a taxa fotossintética (A), concentração interna de CO<sub>2</sub> (C<sub>i</sub>), condutância estomática (g<sub>s</sub>), taxa transpiratória (Tr) e teor de clorofila foram influenciados pelos dois níveis de acidez e tipos de solo (Tabela 4).

No geral, as plantas cultivadas no Latossolo apresentaram os maiores valores de  $A$ ,  $C_i$ ,  $g_s$ ,  $Tr$ ,  $EUH_2O$  e clorofila, sendo o efeito do tipo de solo maior nos tratamentos sem aplicação de calcário.

O efeito significativo das doses de Cu independentemente dos tipos de solo e da aplicação de calcário sobre os componentes fisiológicos corrobora os resultados de Moreira et al. (2019) no estudo da eficiência de uso de Cu por cinco cultivares de soja.

A deficiência de Cu nas plantas acarreta na redução da concentração de plastocianina, bem como, na atividade do fotossistema 1 (FAGERIA, 2009; MARSCHNER, 2012; MIGOCKA; MALAS, 2018; MOREIRA et al., 2019).

No caso do Ca e Mg presente no calcário, estes após solubilizado e absorvido participam direta ou indiretamente das atividades fotossintéticas, seja como ativador enzimático via calmodulina ou constituinte da molécula da clorofila (WHITE; BROADLEY, 2003; MALAVOLTA, 2006; MARSCHNER, 2012).

### 5.1.5 Conclusões

O aumento das concentrações de Ca e Mg no solo podem decrescer a absorção e acúmulo de metais pesados, como o Cu, devido a competição entre os íons pelos mesmos sítios de absorção.

A calagem e as doses de Cu não apresentaram interação, porém a aplicação de  $5 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário aumentou a produção de soja em 18% no Latossolo e 346% no Neossolo quando comparado com o tratamento sem aplicação.

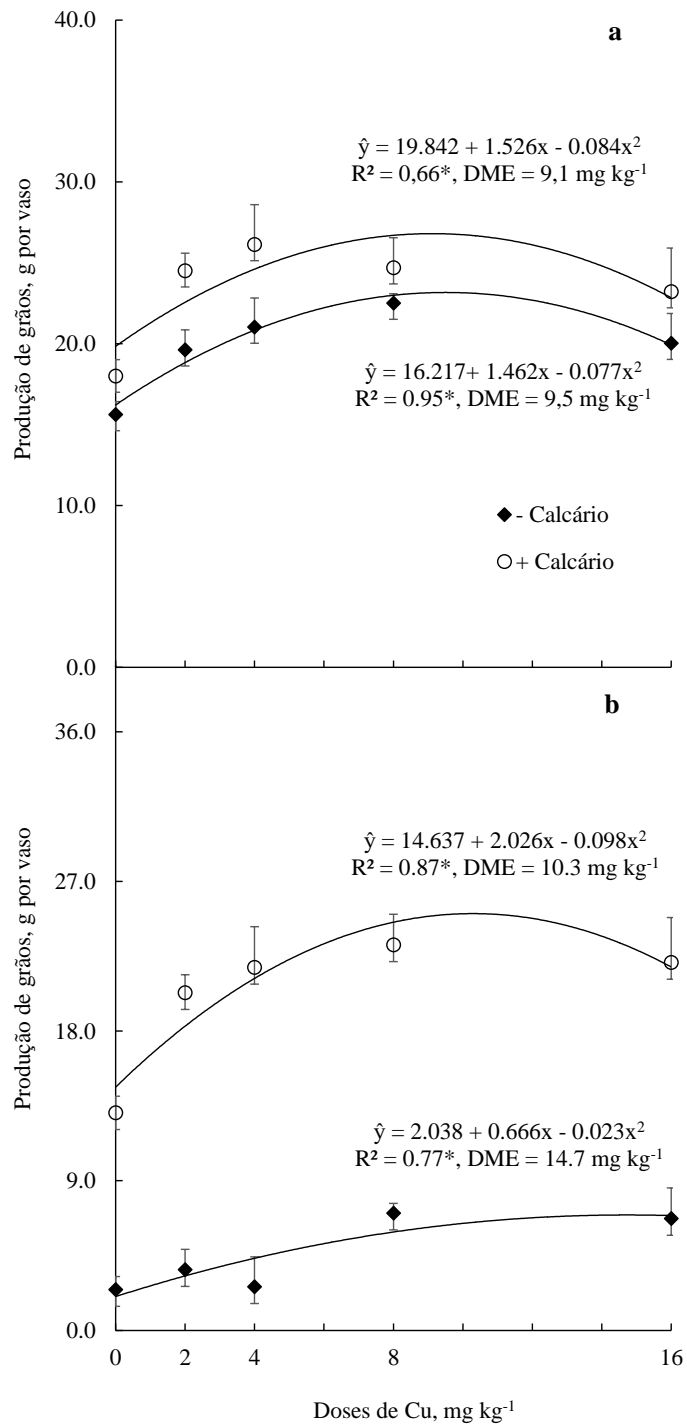
A soja também respondeu a fertilização com Cu, tendo efeito quadrático positivo na produção, independentemente dos tipos de solo e da aplicação ou não de calcário, o mesmo correu com os teores de Cu no solo e na planta e com os componentes fisiológicos ( $A$ ,  $C_i$ ,  $g_s$ ,  $Tr$  e Clorofila).

A elevação dos teores de Ca e Mg no solo e na planta estão diretamente relacionados com a disponibilidade dos nutrientes no solo e mostraram ser eficientes na elevação da produtividade da soja.

### 5.1.6 Agradecimentos

Ao Laboratório de Solos e Nutrição Mineral de Plantas da Universidade Estadual de Londrina (UEL) pela realização das análises laboratoriais de solo e planta. A CAPES pela bolsa de Mestrado ao primeiro autor.

## 5.1.7 Figura



**Figura 3.** Produção de grãos de soja em resposta as doses de cobre com (+) e sem (-) calcário em dois tipos de solo (a) Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, (b) Neossolo Quartzarênico.  
 \* Significativo a 5% de probabilidade.

## 5.1.8 Tabelas

**Tabela 1.** Componentes de produção em resposta a interação calcário e cobre em dois solos representativos com características distintas físicas e químicas distintas.

Doses de Cu mg kg <sup>-1</sup>	MSPA g por vaso		Vagens n. por vaso		Vagens por planta n		Grãos por vagem N		100 sementes g		Volume de raízes cm <sup>3</sup>	
	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Latossolo												
0	37,1	37,9	36,5	49,8	18,1	23,6	2,7	2,7	8,2	11,7	22,5	33,4
2	43,7	57,9	52,5	63,0	15,2	21,0	2,7	2,8	11,6	18,2	24,3	33,9
4	43,5	53,0	60,8	71,8	18,5	23,9	2,7	2,8	10,9	18,3	24,5	35,7
8	51,3	50,8	55,0	70,8	18,9	20,0	2,8	2,8	13,9	17,0	24,3	34,8
16	44,5	49,4	45,5	60,0	12,7	14,0	2,7	2,8	16,2	20,6	25,1	36,4
Média	44,0b	49,8a	50,1b	63,1a	16,7b	20,5a	2,7a	2,8a	12,2b	17,1a	24,1b	34,8a
Argissolo												
0	14,4	29,3	7,8	28,0	2,9	8,5	2,6	2,7	11,0	9,8	18,1	23,9
2	16,1	30,2	9,5	47,8	2,9	16,2	2,7	2,8	12,9	13,7	17,9	24,9
4	14,6	41,5	7,5	55,0	2,5	18,3	2,6	2,8	12,7	15,2	19,2	25,6
8	21,4	49,6	19,5	72,5	8,6	24,1	2,8	2,8	9,6	14,8	18,4	24,7
16	21,9	42,0	8,8	64,8	4,2	21,6	2,7	2,7	15,0	14,6	18,6	23,4
Média	17,7b	38,5a	10,6b	53,6a	4,2b	17,7a	2,7a	2,8a	12,3a	13,6a	18,4b	24,5a
0												
0	25,8	33,6	22,2	38,9	10,5	16,1	2,7	2,7	9,6	10,7	20,3	28,7
2	29,9	55,5	31,0	55,4	9,1	18,6	2,7	2,7	12,3	15,9	21,1	29,4
4	29,1	47,3	34,2	63,4	10,5	21,1	2,7	2,7	11,8	16,7	21,9	30,7
8	36,4	50,2	37,3	71,7	13,8	22,1	2,8	2,8	14,7	15,9	21,4	29,8
16	33,2	45,7	27,2	62,4	8,5	17,8	2,8	2,7	15,6	17,6	21,9	29,9
Média	30,9b	44,2a	30,4b	58,4a	10,5b	19,1a	2,7a	2,7a	12,2a	15,4a	21,3b	29,7a
Teste F												
Solo	*			*			*	ns		*		
Calc.(a)	*			*			*	ns		*		
Dose (b)	*			*			*	ns		*		
a × b	*			*			*	ns		*		
CV %	12,1			14,3			13,5	8,1		16,7		

Significant (F-test,  $p \leq 0.05$ ) and ns non-significant (F-test,  $p > 0.05$ ). Médias seguidas por letras distintas entre os dois tipos de solo e dentro de cada variável diferem entre si a 5% pelo teste de Tukey.

**Tabela 2.** Atributos químicos do solo em resposta a interação calcário e cobre em dois solos representativos com características distintas físicas e químicas distintas.

Doses de Cu mg kg <sup>-1</sup>	(-) Calcário			(+) Calcário		
	Latossolo	Neossolo	Média	Latossolo	Neossolo	Média
	pH, CaCl <sub>2</sub>					
0	5.3	4.5	4,9	6.7	6.6	6,7
2	5.1	4.6	4,9	6.8	6.4	6,6
4	5.2	4.5	4,9	6.8	6.4	6,6
8	5.3	4.3	4,8	6.5	6.4	6,4
16	5.4	4.4	4,9	6.8	6.4	6,6
Média	5.3a	4.5b	4,9	6.7a	6.4a	6,7
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Ca <sup>2+</sup> , cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>					
0	1.9	0,5	1,2	7.1	6.2	6,7
2	1.6	0.6	1,1	8.9	5.1	7.0
4	1.3	0.3	0,8	7.2	5.7	6,4
8	1.9	0.6	1,2	7.9	8.0	8,0
16	1.2	0.8	1.0	7.8	4.7	6,2
Média	1,6a	0,6b	1,1	7,8a	5,9b	6,8
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Mg <sup>2+</sup> , cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>					
0	1.1	1,0	1,0	3.5	3.9	3,7
2	1.1	0.6	0,8	3.1	3.4	3,3
4	1.5	0.5	1,0	4.4	3.9	4,1
8	1.4	0.8	1,1	4.7	4.7	4,7
16	1.0	0.7	0,8	4.8	3.3	4,1
Média	1,2a	0,7b	1,0	4,1a	3,8a	4,0
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	H+Al, cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>					
0	7.2	6,0	7,1	5.7	4.6	5,2
2	7.1	5.9	7,0	4.8	4.7	4,7
4	7.2	6.0	7,1	5.7	4.7	5,2
8	7.2	5.9	7,1	5.7	4.7	5,2
16	7.1	5.9	7,0	5.7	4.7	4,7
Média	7.2a	6.9a	7,1	5,5a	4,7a	5,1
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Cu, mg kg <sup>-1</sup>					
0	1,7	1,1	1,4	1,5	1,0	1,3
2	2,4	2,1	2,3	2,2	1,8	2,0
4	5,6	5,3	5,5	5,1	4,2	4,7
8	9,2	8,4	8,8	8,9	7,7	8,3
16	17,7	14,9	16,3	15,8	14,5	15,2
Média	7,3a	6,4b	6,9	16,8a	15,1b	16,0
Teste F	*	*	*	*	*	*

\* Significant (F-test,  $p \leq 0.05$ ) and ns non-significant (F-test,  $p > 0.05$ ). Médias seguidas por letras distintas entre os dois tipos de solo e dentro de cada variável diferem entre si a 5% pelo teste de Tukey.

**Tabela 3.** Teores foliares de Ca, Mg e Cu em resposta a interação calcário e cobre em dois solos representativos com características distintas físicas e químicas distintas.

Doses de Cu mg kg <sup>-1</sup>	Ca g kg <sup>-1</sup>		Mg g kg <sup>-1</sup>		Cu mg kg <sup>-1</sup>	
	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Latossolo						
0	2,3	3,5	0,8	9,1	2,6	1,3
2	2,0	4,2	0,7	7,9	7,0	3,3
4	3,1	4,9	0,8	7,5	7,4	6,1
8	3,1	4,9	0,9	7,8	7,7	8,2
16	3,2	4,2	1,0	8,9	14,6	10,3
Média	2,7b	4,3a	0,8b	8,2a	7,9a	5,8b
Argissolo						
0	2,4	3,9	1,0	3,8	1,7	1,5
2	2,4	4,0	0,7	3,3	3,9	2,1
4	1,9	5,5	0,6	4,1	4,1	3,2
8	2,9	4,3	0,9	3,1	5,8	4,8
16	2,4	4,4	0,7	3,5	10,1	8,6
Média	2,4b	4,4a	0,8b	3,6a	5,1a	4,0b
Média						
0	2,4	3,7	0,9	6,5	2,1	1,4
2	2,2	4,1	0,7	5,6	5,5	3,7
4	2,5	5,2	0,7	5,8	5,6	4,7
8	3,0	4,6	0,9	5,5	6,8	6,5
16	2,8	4,3	0,8	6,2	12,3	8,4
Média	2,6b	4,4a	0,8b	5,9a	6,5a	4,9b
Teste F						
Solo	*		*		*	
Calcário (a)	*		*		*	
Doses (b)	ns		ns		*	
a x b	ns		ns		*	
CV %	8,4		11,5		9,3	

\* Significant (F-test,  $p \leq 0.05$ ) and ns non-significant (F-test,  $p > 0.05$ ). Médias seguidas por letras distintas entre os dois tipos de solo e dentro de cada variável diferem entre si a 5% pelo teste de Tukey.

**Tabela 4.** Atributos fisiológicos das plantas em resposta a interação calcário e cobre em dois solos representativos com características distintas físicas e químicas distintas.

Doses de Cu mg kg <sup>-1</sup>	(-) Calcário			(+) Calcário		
	Latossolo	Neossolo	Média	Latossolo	Neossolo	Média
Taxa fotossintética (A), $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$						
0	14.00	5.90	9,95	14.71	12.55	13,63
2	18.08	7.49	12,79	20.60	15.34	17,97
4	17.48	6.45	11,97	20.77	17.29	19,03
8	15.60	12.55	14,08	19.51	19.36	19,44
16	14.90	8.42	11,66	16.24	17.44	16,84
Média	16,01a	8,16b	12,09	18,37a	16,40a	17,39
Teste F	*	*	*	*	*	*
Concentração interna de CO <sub>2</sub> (Ci), $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$						
0	222.19	217.99	220,09	236.28	219.41	227,85
2	250.59	222.24	236,42	230.35	235.79	233,07
4	254.28	237.28	245,78	251.74	227.14	239,44
8	242.77	256.40	249,59	259.23	242.25	250,74
16	246.46	226.96	236,71	237.63	244.04	240,84
Média	243,26a	232,18b	237,72	243,05a	233,73b	238,39
Teste F	*	*	*	*	*	*
Condutância estomática (g <sub>s</sub> ), $\text{mmol mol}^{-1}$						
0	0.20	0.07	0,14	0.20	0.17	0,19
2	0.39	0.08	0,23	0.22	0.26	0,23
4	0.40	0.08	0,24	0.29	0.20	0,25
8	0.35	0.19	0,27	0.31	0.29	0,30
16	0.28	0.15	0,22	0.25	0.30	0,28
Média	0,32a	0,11b	0,22	0,26a	0,24a	0,25
Teste F	*	*	*	*	*	*
Taxa transpiratória (Tr), $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$						
0	4.11	1.77	2,94	3.89	3.22	3,56
2	6.26	2.16	4,21	4.79	3.88	4,34
4	6.40	2.14	4,27	4.79	4.06	4,43
8	5.68	3.81	4,75	6.19	5.14	5,67
16	5.18	2.76	3,97	4.36	5.14	4,75
Média	5,53a	2,53b	4,03	4,80a	4,29a	4,55
Teste F	*	*	*	*	*	*
Uso eficiente de água (UEH <sub>2</sub> O), $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$						
0	3,58	3,33	3,46	3,60	3,90	3,75
2	3,29	3,47	3,38	3,77	3,95	3,86
4	3,24	3,01	3,13	3,65	4,26	3,96
8	3,43	3,29	3,36	2,52	3,77	3,15
16	3,13	3,05	3,09	3,42	3,39	3,41
Média	3,32a	3,22a	3,27	3,33a	3,82a	3,58
Teste F	ns	ns	ns	ns	bs	ns
Clorofila, $\text{mg m}^{-2}$						
0	264.76	238.29	251,53	267.41	256.88	262,15
2	293.37	247.19	270,28	279.73	292.84	286,29
4	294.69	253.44	274,07	297.40	299.18	298,29
8	300.90	269.40	285,15	292.18	294.12	293,15
16	281.10	232.13	257,62	266.32	293.37	279,85
Média	286,96a	248,09b	267,53	280,61a	287,28a	283,95
Teste F	*	*	*	*	ns	*

\* Significant (F-test,  $p \leq 0.05$ ) and ns non-significant (F-test,  $p > 0.05$ ). Médias seguidas por letras distintas entre os dois tipos de solo e dentro de cada variável diferem entre si a 5% pelo teste de Tukey.

## 6 CONCLUSÕES GERAIS

A calagem e as doses de cobre atuam de forma independente no incremento da produção de grãos de soja.

Nos dois solos (Latosolo e Neossolo), a soja apresenta respostas positivas a aplicação de Cu.

Com adubações semelhantes e mesmo teor de água, plantas cultivadas em Latossolo apresentam maior produtividade.

O incremento do nível de Cu no solo em solos com diferentes teores de argila aumenta os componentes de produção e fisiológicos na planta.

O número de vagens por plantas (NVP) na soja e altura de plantas (H) são indicativos dos efeitos positivos ou negativos da aplicação de Cu no solo.

As doses de Cu no solo acarretam incremento de forma quadrática no volume de raízes na planta de soja.

Mesmo com adubação semelhante, o tipo de solo é uma das variáveis mais importante para definir a disponibilidade de nutriente no solo.

## REFERÊNCIAS

- ALCACIO, T. E., D. HESTERBERG, J. W. CHOU, J. D. MARTIN, S. BEAUCHEMIN, and D. E. SAYERS. 2001. Molecular scale characteristics of Cu(II) bonding in goethite–humate complexes. *Geochimica Cosmochimica Acta Journal*, 65:1355–1366.
- ALLEN, S. E., G. L. TERMAN, L. B. CLEMENTS, and R. MIKKELSEN. 1976. *Greenhouse Techniques for Soil-Plant Fertilizer Research*. Muscle Shoals, USA: Tennessee Valley Authority, 1976.
- ALLOWAY, B. J. 2013. Sources of heavy metals and metalloids in soils. In *Heavy Metals n Soils Environmental Pollution*, pp.11–50, ed. B. J. Alloway. Springer: Dordrecht, Netherlands.
- ANDRÉS-COLÁS, N.; A. PEREA-GARCÍA, S. M. DE ANDRÉS, A. GARCIA-MOLINA, E. DORCEY, S. RODRÍGUEZ-NAVARRO, M. A. PÉREZ-AMADOR, S. PUIG, and L. PEÑARRUBIA. 2013. Comparison of global responses to mild deficiency and excess copper levels in *Arabidopsis* seedlings. *Metallomics*, 5:1234–1246.
- BRADL, H. B. 2004. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*, 277:1–18.
- BURKHEAD, J. L., K. A. GOGOLIN REYNOLDS, S. E. ABDEL-GHANY, C. M. COHU, and M. PILON. 2009. Copper homeostasis. *New Phytologist*, 182:799–816.
- CAIRES, E. F., and C. A. ROSOLEM. 1998. Lime effects in soil acidity and root growth of peanut. *Bragantia* 57:175–184.
- CAIRES, E. F., L. R. F. ALLEONI, M. A. CAMBRI, and G. BARTH. 2005. Surface Application of Lime for Crop Grain Production under a No-Till System *Agronomy Journal*, 97:791–798.
- CARR, H. S. and D. R. WINGE. 2003. Assembly of cytochrome c oxidase within the mitochondrion. *Accounts of Chemistry Research*, 36:30–316.
- CASSEL, D. K., and D. R. NIELSEN. 1986. Field capacity and available water capacity. In *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5.1, 2nd Edition, ed. A. KLUTE. 901–926. Madison, USA: American Society of Agronomy.
- CASTRO, G. S. A., and C. A. C. CRUSCIOL. 2013. Yield and mineral nutrition of soybean, maize, and Congo signal grass as affected by limestone and slag. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 48:673–681.
- CONAB. 2016 *Companhia Nacional de Abastecimento*. Acompanhamento da safra brasileira de grãos s, v. 3 - Safra 2015/16. CONAB: Brasília, Brasil.
- CONTE, O., A. OLIVEIRA JUNIOR, C. CASTRO, and F. A. OLIVEIRA. 2019. Calagem e Adubação. In: OLIVEIRA, A. B., R. M. V. B. C. LEITE, A. A. BALBINOT JUNIOR, C. D. S. SEIXA, and H. S. KERN. (Eds.) *Soja*. Londrina. Embrapa Soja. p.91-107.
- DEL POZO, T., V. CAMBIAZO, and M. GONZÁLEZ. 2010. Gene expression profiling analysis of copper homeostasis in *Arabidopsis thaliana*. *Biochemical and Biophysical Research Communication*, 393:248–252.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 1997. *Manual of soil analysis methods*. 2nd ed. National Soil Research Center: Rio de Janeiro, Brazil.

- FAGERIA, N. K.; GHEYI, H. R.; LIMA, L. A. Efeitos dos sais sobre as plantas. *Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada*. Campina Grande: UFPB/SBEA, p. 125-131, 1997.
- FAGERIA N. K. 2009. *The Use of Nutrients in Crop Plants*. CRC Press: New York, USA.
- FAGERIA, N. K., A. B. SANTOS, and A. MOREIRA. 2010. Yield, nutrient uptake, and changes in soil chemical properties as influenced by liming and iron application in common bean in a no-tillage system. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 41: 1740–1749.
- FAGERIA, N. K., L. F. STONE, and L. C. MELO. 2015. Copper-use efficiency in dry bean genotypes, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46:979–990.
- FEHR, W. R., C. E. CAVINESS, D. T. BURMOOD, and J. S. PENNINGTON. 1971. Stage of development description for soybeans (*Glycine max* (L.) Merrill). *Crop Science* 11:929–931.
- FESTA, R. A., and D. J. THIELE. 2011. Copper: An essential metal in biology. *Current Biology*, 21:R877–R883.
- FRITSCHI F. B., and J. D. RAY. 2007. Soybean leaf nitrogen, chlorophyll content, and chlorophyll a/b ratio. *Photosynthetica* 45:92–98.
- HÄNSCH, R., and R. R. MENDEL. 2009. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology*, 12:259–266.
- HAVLIN, J. L., J. D. BEATON, S. L. TISDALE, and W. L. NELSON. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers*. 7<sup>th</sup> ed. Pearson Education, Upper Saddle River.
- HIPPLER, F. W. R., R. M. BOARETTO, V. L. DOVIS, J. A. QUAGGIO, R. A. AZEVEDO, and D. MATTOS JÚNIOR. 2018. Oxidative stress induced by Cu nutritional disorders in Citrus depends on nitrogen and calcium availability. *Scientific Reports* 8:1641.
- HIRAKURI, M. H., and J. J. LAZZAROTTO. 2014. *O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro*. Embrapa Soja: Londrina, Brasil.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 2020. *IBGE prevê safra recorde de grãos em 2020*. Disponível em: < <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/26537-ibge-preve-safra-recorde-de-graos-em-2020> >. Acesso em: 6 fev. 2020.
- KAWASAKI, T., and M. MORITSUGU. 1987. Effects of calcium on the absorption and translocation of heavy metals in excised barley roots: multi-compartment transport box experiment. *Plant Soil* 100:21–34.
- LOPES, A.S., M. C. SILVA, and L. R. G. GUILHERME. 1991. *Acidez do solo e calagem*. São Paulo; Anda. 22p.
- LIU, R., B. GOODELL, J. JELLISON, and A. AMIORBAHMAN. 2015. Electrochemical study of 2,3-dihydroxybenzoic acid and its interaction with Cu(II) an H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in aqueous solutions: Implications for wood decay. *Environmental Science and Technology*, 39:175-180.
- MALAVOLTA, E. 2006. *Manual de nutrição mineral de plantas*. Piracicaba, Brazil: Agronômica Ceres.
- MALAVOLTA, E., G. C. VITTI, and S. A. OLIVEIRA. 1997. *Evaluation of Nutritional Status of Plants; principles and application* [Avaliação do Estado Nutricional das

- Plantas; princípios e aplicações]. Piracicaba, Brazil: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato.
- MARSCHNER, H. and V. RÖMHELD. 1994. Strategies of plants for acquisition of iron. *Plant and Soil*, 165:261-274.
- MARSCHNER, P. 2012. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. London, UK: Academic Press.
- MASUDA, T. and P. D. GOLDSMITH. 2009. World Soybean Production: area harvested, yield, and long-term projections. *International Food and Agribusiness Management Review*, 12:233–255.
- MCBRIDE, M. B., S. SAUVÉ, and W. HENDERSHOT. 1997. Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 48:1365–1389.
- MIGOCKA, M. and K. MALAS, 2018. Plant responses to copper: molecular and regulatory mechanisms of copper uptake, distribution and accumulation in plants. In *Plant Micronutrient Use Efficiency: Molecular and Genomic Perspectives in Crop Plants*, pp. 71–86, ed. M. A. HOSSAIN, T. KAMIYA, D. J. BURRIT, L. S. P. TRAN, and T. Fujiwara. London: Elsevier.
- MOREIRA, A., and L. A. C. MORAES. 2019. Soybean response to copper applied to two soils with different level of organic matter and clay. *Journal of Plant Nutrition* 42:2247–2258.
- MOREIRA, A., and N. K. FAGERIA. 2010. Liming influence on soil chemical properties, nutritional status and yield of alfalfa grown in acid soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34:1231–1239.
- MOREIRA, A., L. A. C. MORAES, and G. SCHROTH. 2019. Copper fertilization in soybean-wheat intercropping under no-till management. *Soil & Tillage Research* 193:133–141.
- MOREIRA, A., L. A. C. MORAES, I. C. V. LARA, and T. A. R. NOGUEIRA. 2017. Differential response of soybean genotypes to two lime rates. *Archives of Agronomy and Soil Science* 63:1281–1291.
- MOREIRA, A., L. A. C. MORAES, T. A. R. NOGUEIRA, and B. T. CANIZELLA. 2019. Copper use efficiency in soybean cultivars. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 54:e01140.
- MOREIRA, A., N. K. FAGERIA, and A. GARCIA y GARCIA. 2011. Effect of liming on the nutritional conditions and yield of alfalfa grown in tropical conditions. *Journal of Plant Nutrition* 34:1107–1119.
- NAVARRETE, J. U., D. M. BORROK, M. VIVEROS, and J. T. ELLZEY. 2011. Copper isotope fractionation during surface adsorption and intracellular incorporation by bacteria. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75:784–799.
- NOGUEIRA, O. P. A., T. SEDIYAMA, B. H. BARROS, and C. R. TEIXEIRA. 2009. Morfologia, crescimento e desenvolvimento. In *Tecnologias de produção e usos da soja*, pp.7–16, ed. T. SEDIYAMA. Macenas: Londrina, Brasil.
- ÖSTERÁS, A. H., and M. GREGER. 2006. Interactions between calcium and copper or cadmium in Norway spruce. *Biologia Plantarum* 50:647–652.
- PARVEEN, I., M. D. THREADGILL, J. M. MOORBY, and A. WINTERS. 2010. Oxidative phenols in forage crops containing polyphenol oxidase enzymes. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 58:1371–1382.

- PRINTZ, B., S. LUTTS, J. F. HAUSMAN, and K. SERGEANT. 2016. Copper trafficking in plants and its implication on cell wall dynamics. *Frontiers in Plant Science*, 7:1–16.
- RAIJ, B. 2011. *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. Piracicaba: Potafos. 420p.
- RIDGE, P., Y. ZHANG, and V. GLADYSHEV. 2008. Comparative genomic analyses of copper transporters and cuproproteomes reveal evolutionary dynamics of copper utilization and its link to oxygen. *PLoS ONE*, 3:e1378.
- ROBINSON, N. J., C. M. PROCTER, E. L. CONNOLY, and M. L. GUERINOT. 1999. A ferric-chelate reductase for iron uptake from soils. *Nature*, 397:694–697.
- RODRIGO-MORENO, A., N. ANDRÉS-COLÁS, C. POSCHENRIEDER, B. GUNSÉ, L. PEÑARRUBIA, and S. SHABALA. 2013. Calcium- and potassium-permeable plasma membrane transporters are activated by copper in *Arabidopsis* root tips: linking copper transport with cytosolic hydroxyl radical production. *Plant Cell Environment*, 36:844–855.
- SEDIYAMA, T., R. C. TEIXEIRA, and H. B. BARROS. 2009. Origem, Evolução e Importância Econômica. In *Tecnologias de produção e usos da soja*, pp.23–44, ed. T. SEDIYAMA. Macenas: Londrina, Brasil.
- SHAPIRO, S. S., and M. B. WILK. 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52:591–611.
- URANO, E. O. M., C. H. KURIHARA, S. MAEDA, A. C. T. VITORINO, M. C. GONÇALVES, and M. E. MARCHETTI. 2006. Soybean nutritional status evaluation. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41:1421–1428.
- WALKER, C. D., and J. WEBB. 1981. Copper in plants: forms and behavior. In: *Copper in Soils and Plants*, eds. J. F. LONERAGAN, A. D. ROBSON, and R. D. GRAHAM. p.189–212. London: Academic Press.
- WALTERS, D. 2003. Resistance to plant pathogens: possible roles for free polyamines and polyamine catabolism. *New Phytologist*, 159:109–115.
- WHITE, P. J., and M. R. BROADLEY. 2003. Calcium in Plants. *Annals of Botany* 92:487–511.
- WU, J., D.A. LAIRD, and M. L. THOMPSON. 1999. Sorption and desorption of Cu on soil clay component. *Journal of Environmental Quality*, 28:334–338.
- YUAN, H. N., H. H. XU, W. C. LIU, and Y. T. LU. 2013. Copper regulates primary root elongation through PIN1 mediated auxin redistribution. *Plant Cell Physiology*, 54:766–778.
- YURELA, I. 2009. Copper in plants: acquisition, transport and interactions. *Functional Plant Biology*, 36:409–430.
- ZHAO, Q., J. NAKASHIMA, F. CHEN, Y. YIN, C. FU, J. YUN, H. SHAO, X. WANG, Z. Y. WANG, and R. DIXON. 2013. Laccase is necessary and nonredundant with Peroxidase for lignin polymerization during vascular development in *Arabidopsis*. *The Plant Cell*, 25:3976–3987.