

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

Mateus Cancian

**APLICAÇÃO DE COBRE NA CULTURA DA SOJA EM SOLOS COM
ALTOS TEORES DE FÓSFORO**

**Santa Maria, RS
2018**

Mateus Cancian

**APLICAÇÃO DE COBRE NA CULTURA DA SOJA EM SOLOS COM ALTOS
TEORES DE FÓSFORO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Processos Químicos e Ciclagem de Elementos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Dr. Carlos Alberto Ceretta

**Santa Maria, RS
2018**

Cancian, Mateus

Aplicação de cobre na cultura da soja em solos com
altos teores de fósforo / Mateus Cancian.- 2018.
76 p.; 30 cm

Orientador: Carlos Alberto Ceretta
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2018

1. Cobre 2. Fósforo 3. Componentes de rendimento 4.
Soja I. Ceretta, Carlos Alberto II. Título.

Mateus Cancian

**APLICAÇÃO DE COBRE NA CULTURA DA SOJA EM SOLOS COM ALTOS
TEORES DE FÓSFORO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Processos Químicos e Ciclagem de Elementos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo**.

Aprovado em 23 de fevereiro de 2018:

Carlos Alberto Ceretta, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

José Alan de Almeida Acosta, Dr. (DRAKKAR)

Eloir Missio, Dr. (UNIPAMPA)

**Santa Maria, RS
2018.**

Aos meus pais, Ilto e Helena

Ao meu irmão, Rafael

À minha namorada Marjana

A todos meus amigos, colegas e clientes

Dedico este trabalho!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre me iluminando e guiando meu caminho.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e a empresa Drakkar Solos pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao mestre e amigo Carlos Alberto Ceretta, pela orientação, pelos conselhos e confiança, não há palavras para expressar toda a gratidão que tenho pelo senhor.

A empresa Drakkar Solos, aos sócios, a todos os colegas e amigos, mas em especial ao Alan Acosta pela oportunidade, conselhos nos momentos difíceis, amizade e confiança que depositou em mim.

Aos meus pais Ilto e Helena, pela força nos momentos difíceis, muito obrigado por todo carinho, amor e apoio de sempre. A minha namorada Marjana, pela ajuda de sempre, paciência, força e compreensão durante esse período. Ao meu irmão Rafael, pela descontração e apoio.

A todos os colegas da Pós-graduação (não citarei nomes, por medo de esquecer alguém), os quais, tive o privilégio de conhecer e que se tornaram grandes amigos, muito obrigado pela ajuda de sempre, pelas risadas, vocês todos moram em meu coração, tenho muita gratidão a vocês.

Ao professor Paulo Avelar e ao colega Bruno Lazzaretti, pelas conversas, amizade e pela ajuda na execução de todas as etapas do trabalho.

Aos amigos, colegas, professores e clientes pelo apoio, força e conversas no momento que pensei em desistir.

Aos professores do Departamento de Solos, pelos ensinamentos, pelas conversas e amizades durante o curso.

Ao Héverton, secretário do curso de Pós-graduação, pela dedicação e pela competência com que realiza seu trabalho.

Ao cliente e produtor Valter Cioccarri pela área experimental para o estudo.

Aos colegas de Drakkar (equipes de campo e escritório), pelo auxílio na condução do experimento.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, gostaria de expressar minha profunda gratidão.

RESUMO

APLICAÇÃO DE COBRE NA CULTURA DA SOJA EM SOLOS COM ALTOS TEORES DE FÓSFORO

AUTOR: Mateus Cancian
ORIENTADOR: Carlos Alberto Ceretta

Os solos do estado do Rio Grande do Sul, originalmente apresentavam-se bem supridos em micronutrientes. Assim, no início da introdução da cultura da soja, não se recomendava micronutrientes para adubação. Somente após sucessivos anos de extração desses nutrientes pelas crescentes produtividades, e aplicações recorrentes de adubos fosfatados durante vários anos e cultivos em altas doses, é que se tem observado uma maior frequência na ocorrência de deficiências. A disponibilidade de micronutrientes para a planta é afetada por vários fatores do solo e ambiental. O objetivo deste estudo foi avaliar se a aplicação de Cu, via foliar, na cultura da soja é capaz de proporcionar incrementos na produtividade de grãos, em cultivos conduzidos em solos com altos teores de P. O experimento foi conduzido de setembro de 2015 a maio de 2017, no município de Pinhal Grande em um Argissolo Vermelho Distrófico. O experimento foi instalado no delineamento blocos ao acaso, em esquema fatorial (3x3), com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos com três doses de adubação com P_2O_5 (0, 69 e 138 kg ha⁻¹) e três doses de Cu (0, 10 e 20 g ha⁻¹ de Cu), perfazendo um total de nove tratamentos. No primeiro cultivo (safra 2015/2016) foi avaliado o teor foliar de Cu e P e a produtividade, e no segundo cultivo (safra 2016/2017) foi avaliado o teor foliar de Cu e P, a nodulação, os componentes de rendimento, a produtividade e a análise econômica. A aplicação de cobre foliar e fósforo influenciou positivamente o número de legumes por planta, grãos por planta, a massa de 1000 grãos e produtividade da cultura da soja. A aplicação de cobre e fósforo não influenciaram o número de grãos por legume, número de nódulos por planta e a massa de nódulos. Em solos com teores de fósforo previamente muito alto e que receberam aplicações de altas doses de fósforo houve resposta à adubação foliar com cobre na produção de grãos de soja, a qual se mostrou viável economicamente. Por outro lado, os incrementos proporcionados pela aplicação de fósforo nos solos com teores muito altos não foram viáveis economicamente.

Palavras chaves: Produtividade. Componentes de rendimento. Teor foliar. *Glycine max*.

ABSTRACT

COPPER APPLICATION IN SOYBEAN CULTURE IN SOILS WITH HIGH PHOSPHORUS CONTENT

AUTHOR: Mateus Cancian
ADVISOR: Carlos Alberto Ceretta

Soils in the state of Rio Grande do Sul were originally well supplied with micronutrients. Thus, at the beginning of the introduction of the soybean crop, micronutrients were not recommended for fertilization. It is only after successive years of extraction of these nutrients by the increasing yields and recurrent applications of phosphate fertilizers over several years and cultures in high doses that a greater frequency has been observed in the occurrence of deficiencies. The availability of micronutrients to the plant is affected by various soil and environmental factors. The objective of this study was to evaluate if the application of Cu, via foliar, in the soybean crop is able to provide increases in grain yield, in cultures conducted in soils with high levels of P. The experiment was conducted from september 2015 to may of 2017, in the municipality of Pinhal Grande in a Typic Hapludalf. The experiment was installed in a randomized complete block design, in a factorial scheme (3x3), with four replications. The treatments were composed of three fertilization doses with P₂O₅ (0, 69 and 138 kg ha⁻¹) and three Cu doses (0, 10 and 20 g ha⁻¹ Cu), making a total of nine treatments. In the first crop (crop 2015/2016), Cu and P leaf content and productivity were evaluated, and in the second crop (2016/2017 crop) the leaf content of Cu and P was evaluated, nodulation, yield components, productivity and economic analysis. The application of leaf copper and phosphorus positively influenced the number of vegetables per plant, grains per plant, the mass of 1000 grains and the productivity of the soybean crop. The application of copper and phosphorus did not influence the number of grains per legume, number of nodules per plant and mass of nodules. In soils with very high levels of phosphorus and that received applications of high doses of phosphorus there was response to foliar fertilization with copper in the production of soybeans, which was economically feasible. On the other hand, the increments provided by the application of phosphorus in soils with very high contents were not economically viable.

Key words: Productivity. Performance components. Leaf content. *Glycine max*.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Evolução do acúmulo de fósforo no solo na agricultura brasileira ao longo de 22 anos..... 15
- Figura 2** - Dados de precipitação pluvial mensal ocorrido durante o período experimental, nas safras 2015/2016 e 2016/2017.....36
- Figura 3** - Produtividade de grãos da cultura da soja na safra 2015/2016 em solos com altos teores de fósforo submetido a aplicações de fósforo e cobre42
- Figura 4** - Produtividade de grãos da cultura da soja na safra 2016/2017 em solos com altos teores de fósforo submetido a aplicações de fósforo e cobre42
- Figura 5** - Número de grãos por planta e legumes por planta na safra 2016/2017 em solos com altos teores de fósforo submetido a aplicações de fósforo e cobre.....44
- Figura 6** - Massa de 1000 grãos na safra 2016/2017 em solos com altos teores de fósforo submetido a aplicações de fósforo e cobre44
- Figura 7** - Teor foliar de cobre na safra 2015/2016 em solos com altos teores de fósforo submetido a aplicações de fósforo.46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características químicas do solo na profundidade de 0-10 cm antes da instalação do experimento.....	37
Tabela 2 - Classes de interpretação para a disponibilidade de P e Cu no solo para RS e SC.	38
Tabela 3 - Número de grãos por legume na safra 2016/2017 em solos com altos teores de fósforo.	45
Tabela 4 - Número de nódulos por planta e massa de nódulos secos na soja na safra 2016/2017.	45
Tabela 5 - Teor foliar de fósforo e cobre na cultura da soja, no primeiro cultivo (2015/2016) e segundo cultivo (2016/2017).....	47
Tabela 6 - Viabilidade econômica, em reais, da aplicação de P e Cu na produtividade de grãos da soja em solos com altos teores de fósforo, quando comparada com a testemunha, na safra 2016/2017.	48

LISTA DE ANEXOS

Anexo A – Parcelas com aplicação de Cu, via foliar, que ocorreu retardo na maturação fisiológica das plantas.75

Anexo B – Parcelas sem aplicação de Cu, com maturação fisiológica normal das plantas e parcelas com aplicação de Cu, via foliar, que ocorreu retardo na maturação fisiológica das plantas.76

SÚMARIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	12
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Origem da soja e seu desenvolvimento no Brasil.....	17
2.2 Micronutriente: Cobre.....	18
2.3 Macronutriente: Fósforo.....	24
3 HIPÓTESE	31
4 OBJETIVOS	31
4.1 Objetivo Geral.....	31
4.2 Objetivos Específicos.....	31
5 APLICAÇÃO DE COBRE NA CULTURA DA SOJA EM SOLOS COM ALTOS TEORES DE FÓSFORO	32
5.1 Abstract	32
5.2 Introdução	33
5.3 Material e Métodos.....	35
5.4 Resultados.....	40
5.4.1 Produtividade da cultura da soja.....	41
5.4.2 Componentes de rendimento.....	43
5.4.3 Nodulação da soja	45
5.4.4 Cu e P no tecido foliar da soja	46
5.4.5 Análise econômica.....	47
5.5 Discussão	48
5.5.1 Produtividade da cultura da soja.....	48
5.5.2 Componentes de rendimento.....	52
5.5.3 Nodulação da soja	54
5.5.4 Cu e P nas folhas das plantas de soja.....	54
5.5.5 Análise econômica.....	55
5.6 Conclusões.....	56
5.7 Referências.....	57
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
7 ANEXOS	75

1 INTRODUÇÃO GERAL

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma cultura de destaque no cenário mundial de grãos, pois é a principal oleaginosa utilizada na fabricação de óleos comestíveis para alimentação humana. O grão também é utilizado como fonte de proteína vegetal, alimentação animal e, recentemente, na produção de biocombustíveis (DOMINGUES, 2010). Os principais produtores de soja são os Estados Unidos, Brasil e Argentina, que juntos, são responsáveis por 82% da produção mundial. A produção mundial de soja em grãos estimada para a safra 2017/2018 é 344,67 milhões de toneladas. Sendo os maiores importadores de soja, China, União Europeia e México (CONAB, 2017).

O complexo da soja é uma das principais fontes de crescimento do país. Para o setor continuar competitivo no mercado globalizado, os agricultores buscam constantemente o aumento da produtividade, tendo como objetivo obter maior rentabilidade possível. Embora seja uma das grandes responsáveis pelo desempenho econômico brasileiro, sua produtividade oscila de ano a ano e de região a região, devido a diversos fatores como: regime pluviométrico, pragas, doenças, fertilidade do solo, dentre outros (PESKE et al., 2009). Neste propósito, observa-se constantemente o lançamento de tecnologias, dentre elas, o desenvolvimento de novos fertilizantes, defensivos agrícolas, máquinas modernas e cultivares (CARVALHO et al., 2009). Porém, com o objetivo de obter melhor retorno financeiro, algumas práticas de produção intensivas (monocultura) utilizadas, acabam prejudicando a capacidade produtiva do solo, e como consequências acarretam uma menor produtividade da cultura.

Um grande desafio para os produtores rurais é usar as técnicas de produção e tecnologias de forma eficiente, inteligente e continua. Isso irá ocasionar efeitos significativos na melhoria do solo, conservação, aproveitamento dos recursos e insumos, resultando na redução dos custos de produção e, conseqüentemente, aumento da produtividade. Ressalta-se que, para serem atingidos esses benefícios, o produtor deve estar disposto a realizar mudanças e conscientizar-se sobre a importância do melhor sistema de produção.

A agricultura passa por uma fase que a produtividade, lucratividade e a sustentabilidade são aspectos inquestionáveis de se levar em conta. Nesse

contexto, não são admissíveis improvisações e reduções no rendimento e na rentabilidade da atividade agrícola provocadas por falhas no manejo de fatores de produção. Os micronutrientes, cuja importância já era conhecida há décadas, apenas mais recentemente passaram a ser utilizados de modo mais rotineiro nas adubações em várias regiões, para as mais diversas condições de solo, clima e culturas no Brasil. Isso, devido à incorporação de áreas menos férteis ao sistema produtivo; o repetido cultivo destas por inúmeras safras; aumento da exportação de micronutrientes; uso de cultivares mais exigentes; a aplicação em superfície de calcário, e em doses elevadas, acelerando o aparecimento de deficiências induzidas; os processos atuais de produção e utilização de fertilizantes NPK de alta concentração, reduzindo o conteúdo incidental de micronutrientes nesses produtos; e a aplicação de correção e manutenção de fósforo em superfície no solo, isso, vêm favorecendo o aparecimento de deficiências de micronutrientes em diversas culturas (GIROLDO, 2000; EMBRAPA, 2014).

Embora a exigência das culturas por micronutrientes seja menor quando comparada aos macronutrientes, as deficiências têm aparecido com frequência, demandando um aprimoramento dos conhecimentos sobre o seu comportamento em solos e em plantas. Uma das limitações mais sérias nos estudos com micronutrientes é a falta de dados de campo de longa duração.

Os micronutrientes exercem diversas funções importantes na planta. Uma das mais relatada é a de participação como ativadores de algumas enzimas que promovem a permeabilidade das membranas e o crescimento das plantas. Os micronutrientes vêm sendo estudados em função dos benefícios que promovem na produção e na qualidade das sementes, no entanto, os resultados nem sempre são consistentes, variando em função do tipo de nutriente aplicado, da fase de desenvolvimento em que foi aplicado, da dosagem, entre outros (SÁ, 1994). As consequências da deficiência de micronutrientes sobre a produtividade variam para as diferentes situações de solo, planta e do sistema de manejo adotado (BORKERT e LANTMANN, 1988; VITTI e GRANDO JUNIOR, 2006). Já com relação ao impacto econômico, torna-se difícil estimar as perdas anuais de produtividade causadas pela insuficiente adubação com micronutrientes. Para casos como este, onde as deficiências de micronutrientes muitas vezes podem passar despercebidas, onde se praticam agricultura avançada e se adotam práticas tecnológicas, é essencial a adoção de programas bem estruturados de análise de solo, análise foliar, correlação

entre os nutrientes, calibração e interpretação, quando se almeja diagnosticar problemas de deficiência causados por micronutrientes (BORKERT e LANTMANN, 1988).

O cobre (Cu) é um importante micronutriente relacionado ao crescimento e desenvolvimento das plantas, pode reagir diretamente com o oxigênio molecular e catalisar preferencialmente processos terminais de oxidação. Várias proteínas contendo Cu são importantes nos processos de fotossíntese, respiração, desintoxicação dos radicais livres de superóxidos e lignificação (MARSCHNER, 1995; KERBAUY, 2004). A enzima plastocianina está envolvida no transporte de elétrons durante reações dependentes da luz na fotossíntese. Aproximadamente 70% do Cu contido nas folhas estão situados nos cloroplastos (MALAVOLTA, 2006).

O fósforo (P) é um macronutriente essencial no metabolismo das plantas, desempenha papel importante na transferência de energia da célula, na respiração, além de ser componente estrutural dos ácidos nucléicos de genes e cromossomos, assim como de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolipídeos (TAIZ e ZIEGER, 2009). Com isso, é necessário o uso da adubação fosfatada na cultura da soja. Porém, devido à falta de informação e generalização por parte de alguns produtores e consultores, com a informação dos teores de fósforo naturais dos solos, normalmente, serem menores que o nível crítico de suficiência da cultura, e conseqüentemente, realizando aplicações recorrentes de adubos fosfatados no solo durante vários anos e cultivos em altas doses, em alguns casos, sem o adequado monitoramento através de análise química nos seus talhões para o uso de critérios técnicos e uma correta nutrição das plantas ao longo dos anos, fez com que surgissem solos com altos teores de fósforo (Figura 1), e assim, diminuindo a absorção de cobre pelas plantas e conseqüentemente teores abaixo do adequado no tecido foliar, que pode ocasionar redução da produtividade.

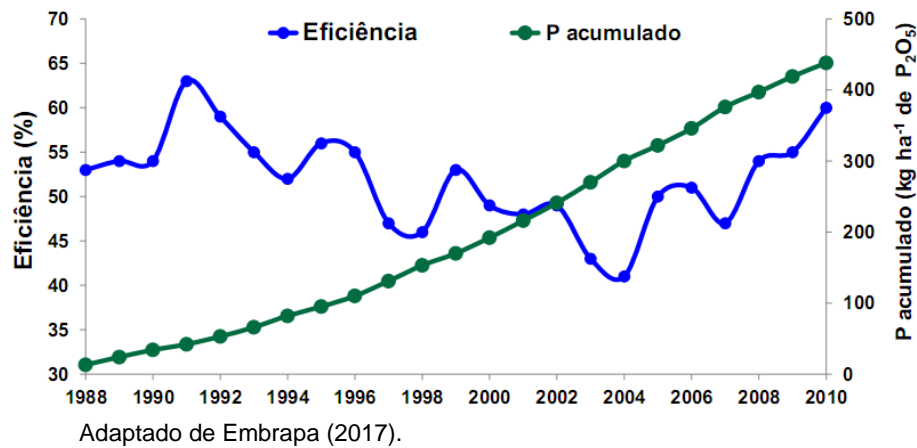


Figura 1. Evolução do acúmulo de fósforo no solo na agricultura brasileira ao longo de 22 anos.

Em locais com aplicação elevada de P e teores adequados de Cu no solo, os elevados teores de P podem ocasionar reações no solo aumentando a adsorção de Cu (PÉREZ-NOVO et al., 2011a), diminuindo a absorção de Cu pelas plantas (TENG e TIMMER, 1990), possivelmente pela interação Cu-P na superfície dos oxihidroxidos de Fe e Al (PÉREZ-NOVO et al., 2011b). Além disso, a adição de fosfato aumenta a adsorção de Cu em solos ácidos, principalmente devido a um aumento de pH que pode favorecer a formação de espécies prontamente sorvidas de Cu-P (CuHPO_4) na solução, que possuem maior afinidade pela superfície adsorvente do que o Cu sozinho (PÉREZ-NOVO et al., 2009). Na presença de P, o Cu pode agir como elemento de ligação entre o P e matéria orgânica do solo, aumentando a adsorção de P (PÉREZ-NOVO et al., 2011a). A resposta agrônômica da soja à adubação com micronutrientes tem sido variada segundo os estudos realizados, em função dos solos estudados, do próprio micronutriente, das condições ambientes e das cultivares utilizadas. Para alguns nutrientes, quase não há estudos realizados no Brasil. Poucos estudos têm sido realizados com relação ao cobre para a cultura da soja nos solos brasileiros (INOCÊNCIO, et al. 2012).

Uma das alternativas tecnológicas para aumentar a produtividade está baseada no adequado suprimento de nutrientes à planta, porém dispõe-se de poucas pesquisas que apontem os fatores que determinam a produtividade da soja diante de aplicações de cobre em solos com altos teores de fósforo. Surge então, a necessidade de avaliar o estado nutricional e a produtividade da soja em solos com altos teores de fósforo. A importância da pesquisa e esclarecimentos podem agregar

respaldo técnico e econômico para o agronegócio brasileiro, trazendo aumento das produtividades da cultura da soja, de forma sustentável para o solo e meio ambiente.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Origem da soja e seu desenvolvimento no Brasil

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) teve seus primeiros registros de produção na China. Em 1730, teve início a disseminação da cultura no continente europeu. No começo a oleaginosa tinha como finalidade a ornamentação. Em 1804, iniciou a utilização do grão como suplemento na alimentação animal, relatados na Iugoslávia. Nos Estados Unidos, a soja chegou em 1765, sendo o primeiro país do continente americano a cultivá-la. Somente em 1917, houve a descoberta da utilização do grão para extração de óleo, e fez com que o cultivo da oleaginosa aumentasse (HARTMAN et al., 2011).

A soja começou a ser cultivada no Brasil provavelmente em 1882 (SOUSA et al., 2000). O primeiro registro da produção da soja ocorreu no estado da Bahia, porém não teve uma boa adaptação ao clima e, em 1891, novas tentativas foram realizadas no estado de São Paulo, no município de Campinas, onde a planta apresentou melhor desenvolvimento. Neste mesmo ano, a soja também foi introduzida no estado do Rio Grande do Sul (SEDIYAMA, 2009).

A produção da soja somente se estabeleceu como cultura economicamente importante para o Brasil a partir da década de 1960, impulsionada pela política de subsídios ao trigo, que favoreceu a expansão da cultura da soja no país, tanto pelo ponto de vista técnico (potencial de utilização e sucessão à gramínea), quanto pelo aproveitamento da terra, maquinários, infraestrutura e mão de obra. Contudo, mesmo com o crescimento significativo na década de 1960, foi apenas na década de 1970 que a soja se tornou a principal cultura do agronegócio brasileiro, com uma produção considerável não apenas pelo aumento da área cultivada, mas também devido às novas tecnologias disponibilizadas aos produtores (EMBRAPA, 2004).

O crescimento da produção e o aumento da capacidade competitiva da soja brasileira sempre estiveram associados aos avanços científicos das pesquisas e à disponibilização de tecnologias ao setor produtivo. O primeiro registro de cultivo de soja no Rio Grande do Sul foi no município de Santa Rosa, que apresentou bons resultados em virtude da similaridade das condições climáticas com a região de origem dos materiais, o sul dos Estados Unidos. Somente a partir dos anos de 1941

mereceu o primeiro registro estatístico nacional, no Anuário Agrícola do RS, numa área cultivada de 640 hectares, produção de 450 toneladas e rendimento de 700 kg ha⁻¹. Nesse mesmo ano instalou-se a primeira indústria processadora de soja do país, em Santa Rosa, RS (EMBRAPA, 2004).

O Brasil em 1976 produziu pouco mais de 1,21 milhão de tonelada de soja, sendo a região sul responsável por 88,3% da produção. Já na década de 90, a produção da região sul alcançou aproximadamente 6,67 milhões de toneladas, correspondente a 43,33% da soja nacional. Nesta safra 2016/2017 o excelente desenvolvimento da oleaginosa foi respaldado pelo comportamento do clima, em praticamente todas as regiões do país, atingindo uma produção 113,9 milhões de toneladas, numa área de 33,8 milhões de hectares, a partir da qual a região sul produziu 45,40 milhões de toneladas. A produção brasileira de soja se concentra na região Centro-Oeste e na região Sul, as quais, juntas, correspondem a 80% da produção brasileira. A área de produção foi mantida praticamente igual ao ano de 2015/2016 no estado do Rio Grande do Sul, com 5.569 mil hectares, o que configura a melhor safra do estado, com produtividade média de 3.360 kg ha⁻¹ e produção total de 18.713,9 mil toneladas (CONAB, 2017). Atualmente, é a leguminosa de maior importância comercial em nível mundial, tal fato se justifica pela importância do produto tanto para o consumo animal, através do farelo da soja, quanto para o consumo humano, através do óleo. A cultura da soja tem se destacado, especialmente, por abrir novas fronteiras agrícolas em regiões antes limitadas ao plantio de outras espécies.

2.2 Micronutriente: Cobre

A produção agrícola depende, dentre outros fatores, da disponibilidade de nutrientes de forma equilibrada no solo. Os micronutrientes essenciais, como: cobre (Cu), boro (B), manganês (Mn), molibdênio (Mo), cobalto (Co) e zinco (Zn), são absorvidos em pequenas quantidades pelas plantas, quando comparados aos macronutrientes. Um dos pontos mais importantes de ser levado em consideração para aumentar a eficiência agrônômica dos micronutrientes é conhecer os fatores que afetam a disponibilidade dos mesmos, inclusive os possíveis antagonismos e sinergismos fisiológicos entre os vários nutrientes. Além disso, os micronutrientes

(Cu, Mn, Zn, B) estão envolvidos na fase reprodutiva das plantas e, conseqüentemente, na determinação da produtividade e da qualidade da cultura colhida (VITTI e GRANDO JUNIOR, 2006).

No Brasil, problemas com deficiência de micronutrientes na cultura da soja vêm levando a limitações de altas produtividades, e influenciando na qualidade e aspectos fitossanitários, assim tornando-se motivo de preocupações (VITTI e GRANDO JUNIOR, 2006). A adubação com micronutrientes envolve aspectos que necessitam ser monitorados, incluindo, além da análise do solo, respostas das culturas, fontes e métodos de aplicação do fertilizante e critérios de recomendação.

Os solos do estado do Rio Grande do Sul, originalmente apresentavam-se bem supridos em micronutrientes essenciais. Assim, desde a introdução da cultura da soja, no início da década de 1960, não se recomendava micronutrientes para adubação. Somente após sucessivos anos de extração desses nutrientes pelas crescentes produtividades, é que se tem observado uma maior frequência na ocorrência de deficiências (SFREDO et al., 1996). As quantidades necessárias de micronutrientes são da ordem de miligramas por quilograma de matéria seca de planta. Isso se deve ao fato de não constituírem estruturas da planta, mas por participarem da formação de enzimas ou, por então, atuar como suas ativadoras (FERNANDES, 2006).

O cobre se apresenta no solo quase que exclusivamente na forma Cu^{2+} (cátion divalente). Está presente em minerais primários e secundários, bem como ligado a compostos orgânicos, à colóides do solo na forma de cátion trocável ou como constituinte da solução do solo. A proporção de Cu complexado pela matéria orgânica na solução do solo chega a atingir 98% (FERREIRA e CRUZ, 1991). O Cu é adsorvido com alta energia pelo solo, formando complexos de esfera interna sem moléculas de água interpondo a superfície do colóide e o metal. Nesse caso, o metal perde a água de hidratação e liga-se diretamente ao grupo funcional. Os complexos de esfera interna envolvem a combinação de ligações covalentes e iônicas, denominada de quimiossorção ou adsorção específica. O Cu é adsorvido preferencialmente pela forma orgânica (MELO et al., 2016).

O cobre é absorvido pelas raízes na forma Cu^{2+} e como quelatos solúveis. Na planta, o Cu participa de inúmeras enzimas, atuando em praticamente todas as vias metabólicas do vegetal, especialmente no metabolismo de carboidratos, do nitrogênio e na síntese de lignina. Sua presença em grupos prostéticos permite que

eles catalisem processos redox por transferência de elétrons (FERREIRA e CRUZ, 1991; KIRKBY e ROMHELD, 2007). A difusão é o principal mecanismo de absorção do Cu pela soja, o Cu atua no processo da fotossíntese, aumenta a resistência da soja às doenças e atua na síntese proteica (HÄNSCH e MENDEL, 2009).

O Cu é um importante micronutriente relacionado ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Pode reagir diretamente com o oxigênio molecular e catalisar preferencialmente processos terminais de oxidação. Várias proteínas contendo cobre são importantes nos processos de fotossíntese, respiração, da desintoxicação dos radicais livres de superóxidos e lignificação (MARSCHNER, 1995; KERBAUY, 2004).

Quando há deficiência de Cu, as atividades de todas essas enzimas ficam drasticamente reduzidas. Uma destas enzimas, a plastocianina está envolvida no transporte de elétrons durante reações na catalise de reação redox pelas mitocôndrias e cloroplastos, dependentes da luz na fotossíntese. O decréscimo do transporte fotossintético de elétrons, como consequência especialmente dos menores teores da plastocianina, uma proteína contendo Cu, diminui a taxa de fixação de CO₂, de tal modo que o teor de amido e de carboidratos solúveis (especialmente sacarose) é diminuído. Este é o principal fator que causa a redução da produção de matéria seca em plantas que sofrem deficiência de Cu durante o crescimento vegetativo. A falta de suprimento de carboidratos para os nódulos das leguminosas, causando crescimento restrito e deficiência de N na planta hospedeira, também parece ser um efeito indireto da deficiência de Cu. Sendo que a deficiência de Cu afeta grãos, sementes e a formação dos frutos mais do que o crescimento vegetativo (CAKMAK, 2000; KERBAUY, 2004). Aproximadamente 70% do Cu contido nas folhas estão situados nos cloroplastos, é considerado, essencial à fotossíntese e a produção de clorofila, e na participação em enzimas (TAIZ e ZEIGER, 2002; MALAVOLTA, 2006). O papel do Cu no metabolismo secundário pode ser melhor relacionado com o aparecimento dos sintomas de deficiência. As enzimas polifenoloxidase, ascorbato oxidase e diamino oxidase contêm Cu, e ocorrem nas paredes celulares e desempenham um papel nas vias biossintéticas desde fenol via quinona até substâncias melanóticas e lignina (CAKMAK, 2000). A deficiência de Cu diminui a atividade dessas enzimas, levando ao acúmulo de fenóis e à diminuição da lignificação e de substâncias melanóticas. Este papel do Cu no metabolismo secundário indica uma função importante do elemento para conferir à

planta resistência a doenças. A formação da lignina significa uma barreira mecânica contra a entrada de organismos, assim como a produção de substâncias melanóticas também aumenta a resistência, pois alguns desses compostos são ativos como fitoalexinas, as quais inibem a germinação de esporos e o crescimento fúngico (REUTER et al., 1981; ÇAKMAK, 2000).

O Cu também tem função na fixação simbiótica de N_2 em leguminosas (MALAVOLTA et al., 1997). Possíveis explicações para o Cu influenciar a fixação simbiótica de N_2 em leguminosas, é que, em presença de Cu, há maior retenção de Fe nos nódulos e menor transporte para a parte aérea, o que aumenta a produção de leghemoglobina e, por isso, favorece a fixação do N_2 . Quando há deficiência, cai à atividade da polifenoloxidase, acumulando-se difenóis, com menor produção de melaninas, havendo inibição dos rizóbios e, conseqüentemente, há menor nodulação.

Sua deficiência aparece primeiro nos ramos mais novos, como amarelecimento, murchamento das folhas e morte das regiões de crescimento dos ramos. Em gramíneas a cor parda da panícula e o seu encurvamento são sintomas típicos de deficiência (TAIZ e ZEIGER, 2002). A mobilidade do Cu em vegetais é restrita, podendo, no entanto, ser translocado das folhas mais velhas para as mais novas, apresentando-se tanto no xilema quanto no floema compondo substâncias orgânicas aniônicas, provavelmente quelatizado por aminoácidos. A mobilidade do Cu depende do seu teor no tecido, em plantas bem nutridas, transloca-se com facilidade até os grãos, enquanto nas deficientes tal movimento é mais difícil. De um modo geral, os órgãos mais novos são os primeiros a apresentar sintomas de deficiência de Cu. É possível também que, em muitos casos, deficiências de Cu promovam reduções da produtividade vegetal sem que, no entanto, o vegetal apresente qualquer sintoma típico que seja observável externamente, é possível que tal fenômeno ocorra, com uma frequência muito maior do que geralmente se estima (FERREIRA e CRUZ, 1991).

Para cada tonelada de grãos de soja produzida são exportados, em média, 10 g de Cu. Esse valor dá a dimensão da importância desse micronutriente para a cultura da soja, alertando para a necessidade de restituí-los, total ou parcialmente, através das diversas técnicas de adubação, especialmente nos solos mais pobres ou quando se almeja obter e manter altos patamares de produtividade (EMBRAPA, 2014). Do total de micronutrientes extraídos pela cultura da soja, expressiva parte

retorna ao solo através da decomposição das folhas, hastes, vagens e raízes, no entanto, uma parcela, variável segundo cada nutriente, é retirada juntamente com os grãos. Essa parcela exportada foi estimada, em função do total absorvido pela planta, como sendo para o Cu, 45,5% (BATAGLIA e MASCARENHAS, 1977). Em estudo envolvendo 22 cultivares de soja, foram determinados os valores exportados como equivalentes, em média, 10,0 g de Cu por tonelada de grãos produzidos (SANTOS, 1999). Certamente que esses valores variam de acordo com os teores disponíveis em cada solo, com as condições do ambiente e com a capacidade de extração de cada cultivar (SANTOS, 1999). Embora as quantidades exportadas pela colheita dos grãos sejam consideradas pequenas, deve-se ter em mente que as reservas dos solos também são limitadas, especialmente dos solos arenosos, de modo que a contínua retirada, sem a devida reposição, pode determinar o aparecimento de deficiências e redução da produtividade.

Alguns fatores estão associados à deficiência e à disponibilidade dos micronutrientes, entre eles, material de origem do solo, pH do solo, textura do solo, práticas culturais, calagem, adubação fosfatada, matéria orgânica, entre outros. Quanto ao material de origem do solo e à textura, fatores não controlados pelo homem, tem-se que solos originários de arenito e solos de textura grosseira apresentam maiores probabilidades de resposta a micronutrientes quando comparados com solos originários de basalto e solos de textura mais fina. Solos arenosos com baixos teores de matéria orgânica podem tornar-se deficientes em Cu, em função de perdas por lixiviação. Devido às condições naturais ácidas dos solos brasileiros e à necessidade da prática da calagem, a disponibilidade de micronutrientes para as plantas é dependente principalmente do pH do solo. A disponibilidade do Cu é afetada pela variação da acidez do solo, aumentando-se o pH do solo, diminui-se os teores de Cu em solução, devido à forte adsorção à fase sólida (MENGEL e KIRKBY, 1987). Portanto, com a correção da acidez do solo, pode-se proporcionar um aumento da CTC dependente de pH e na adsorção de Cu na superfície dos coloides, contribuindo assim, para a diminuição de sua disponibilidade.

A adubação fosfatada pode propiciar formação de precipitados pouco solúveis do H_2PO_4 com cátions metálicos, e reduzir também a disponibilidade. Além disso, solos orgânicos podem apresentar deficiência de Cu. Tais solos geralmente apresentam abundância desse micronutriente, mas devido à presença de matéria

orgânica, pode haver formação de quelatos estáveis de micronutrientes metálicos. Desta forma, apenas pequenas quantidades destes micronutrientes ficam disponíveis para a cultura (VITTI e LUZ, 1998). O acúmulo de matéria orgânica em superfície, devido ao sistema plantio direto, ausência de incorporação dos corretivos, do acúmulo de restos vegetais e de adubos em superfície, pode interferir diretamente na disponibilidade de nutrientes, especialmente os micronutrientes metálicos (TEIXEIRA et al., 2003).

No Brasil a análise química de solos é um dos métodos mais utilizados para a avaliação da sua fertilidade e para a recomendação de práticas para o seu manejo (LOPES e CARVALHO, 1991). Isoladamente, a análise de solo é insuficiente para assegurar um diagnóstico seguro da capacidade de fornecimento de nutrientes pelo solo às plantas e um acompanhamento de seu estado nutricional. A disponibilização de nutrientes pelo solo, mesmo que em quantidades supostamente suficientes, não garante o suprimento das necessidades das plantas, uma vez que muitos outros fatores interferem na sua absorção. No entanto, a maior vantagem da análise do solo é que esta permite que se estime a disponibilidade de nutrientes no solo antes da implantação da cultura (TISDALE et al., 1993). Como para alguns nutrientes os critérios de análise de solo são incipientes, a análise foliar pode complementar as informações geradas por esse método (RAIJ, 1983). Por ser um dos locais de maior atividade na planta, a folha é o órgão onde as alterações fisiológicas provocadas por distúrbios nutricionais são mais evidentes, além de melhor refletir as variações no suprimento de um nutriente a partir do solo ou de adubações (MALAVOLTA et al, 1989).

A análise química de solo e a análise foliar, cujos resultados são interpretados a partir de critérios das faixas de concentração, podem ser boas ferramentas para o diagnóstico e recomendação dos diferentes manejos no processo de produção, tais como a aplicação de corretivos da acidez do solo e de fertilizantes. Utilizando-se essas técnicas, pode-se prevenir reduções no rendimento provocadas por deficiência ou por excesso de nutrientes (RAIJ, 1983; LOPES e CARVALHO, 1991).

A soja é uma cultura exigente em macro e micronutrientes essenciais. A eficiente absorção e o aproveitamento destes nutrientes dependem de sua quantidade e disponibilidade no solo, em relações equilibradas e nos momentos que se fizerem necessários. A insuficiência ou o desequilíbrio entre os mesmos no solo pode limitar a absorção de alguns e estimular a absorção de outros. Os

micronutrientes, apesar de requeridos em doses baixas, são muito importantes. A deficiência de um micronutriente nas plantas pode desorganizar os processos metabólicos e causar a deficiência de um macronutriente (EMBRAPA, 1996).

As deficiências de Cu podem ocorrer por excesso de adubação fosfatada e/ou baixos níveis de matéria orgânica no solo (SFREDO, 2008). Fancelli (2003) relata que a resposta à adubação com micronutrientes nem sempre pode ser visualizada na produtividade, mas sim no vigor das plantas, na tolerância a pragas e doenças e até na qualidade do produto colhido. Nos poucos trabalhos que avaliaram o efeito da aplicação de Cu no rendimento de grãos de soja (MASCARENHAS, et al., 1967; BUZETTI et al., 1989; GALRÃO, 1999), alguns relataram aumentos que variaram de 13,4 a 22,2%. No exterior, o número de trabalhos que avaliaram o efeito da aplicação de Cu no rendimento de grãos de soja também é reduzido (SIMS e JOHNSON, 2004). Robertson et al. (1973) obtiveram aumentos que variaram de 13 a 23% e Makarim e Cox (1983) constataram, em dois locais, aumentos de 10 a 14%. Galvão (1991) afirma que a resposta da soja a adubação com Cu é muito restrita, e dependente da sua disponibilidade no solo. O efeito do Cu no rendimento de grãos de soja foi avaliado em um trabalho realizado por Galvão (1991), onde obteve um pequeno aumento na produtividade de 0,58, 0,41, e 0,47 T ha⁻¹ de grãos respectivamente, no segundo, terceiro e quarto cultivo, após a aplicação a lanço de 2 kg ha⁻¹ de cobre, o que mostra seu prolongado efeito residual.

O fornecimento de Cu às culturas pode ser feito por aplicação ao solo, via foliar ou por tratamento de sementes (LUCHESE et al., 2004). Mesmo com as aplicações, resultados apontam que em sistemas intensivos de cultivo ocorrem sintomas de deficiência de vários elementos no solo, inclusive com aparecimento de sintomas visuais, além de alterações significativas nas propriedades químicas de solo (SFREDO et al., 1995).

2.3 Macronutriente: Fósforo

A soja é uma cultura muito exigente em todos os macronutrientes essenciais. Para que os nutrientes possam ser eficientemente aproveitados pela cultura, devem estar presentes no solo em quantidades suficientes e em relações equilibradas (SFREDO, 2008).

Em termos de fertilidade, o macronutriente fósforo (P) é, talvez, o elemento mais estudado e sobre o qual mais se escreve. Podemos citar alguns motivos, como a importância para a vida da planta, do animal e do homem que se alimentam da planta transformada, bem como sua limitada produção, particularmente nos trópicos (SANCHEZ e SALINAS, 1981). É o elemento mais utilizado no Brasil para a adubação de manutenção e correção de grandes culturas (VILAR et al., 2010). O fósforo é crucial no metabolismo das plantas, desempenhando papel importante na transferência de energia da célula, na respiração e na fotossíntese. É também componente estrutural dos ácidos nucleicos de genes e cromossomos, assim como de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolípidos (TAIZ e ZIEGER, 2009).

Geralmente os solos brasileiros apresentam naturalmente baixos teores de P nos minerais primários, devido ao estágio intermediário/avançado de intemperismo aliados a baixos teores de P disponível (BOITT, 2014). Assim, a maior parte do P em solos intemperizados está adsorvida ao solo, com diferentes graus de energia, e apenas uma pequena parte permanece disponível, contribuindo à nutrição das plantas (GAMA-RODRIGUES et al., 2014).

O fósforo ocorrente no solo, de interesse agrônômico ou ambiental, é constituído por compostos derivados do ácido ortofosfórico e, menos comumente, dos pirofosfatos. O P no solo é originário principalmente a partir de minerais primários como a apatita, a qual é proveniente do material de origem, de onde são liberados durante a intemperização, resultando em minerais secundários mais estáveis termodinamicamente, ou incorporados a compostos orgânicos biologicamente (WALKER e SYERS, 1976). A dinâmica do P no solo está associada a fatores ambientais que controlam a atividade dos microrganismos, os quais imobilizam ou liberam os íons ortofosfato, e às propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo. Assim, em solos jovens e nos moderadamente intemperizados, ainda ocorre fósforo em minerais primários, mas a maior parte deste elemento se encontra na forma orgânica (Po), ou na forma mineral (Pi), adsorvida fracamente aos minerais secundários. Nos solos altamente intemperizados, predominam as formas inorgânicas ligadas à fração mineral com alta energia e as formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente (SANTOS et al., 2008).

O fósforo do solo é dividido em dois grandes grupos, fósforo inorgânico (Pi) e fósforo orgânico (Po), dependendo da natureza do composto a que está ligado. O fósforo inorgânico é representado pelo P presente na estrutura dos minerais

primários e secundários (precipitados), o P adsorvido em óxidos de Fe e Al e argilominerais, além do P da solução do solo. Ele compõe um intrincado grupo de fosfatos inorgânicos, formando diferentes compostos e com diferentes graus de estabilidade química. Pode ser encontrado ligado aos grupos funcionais silanol e aluminol das arestas das argilas silicatadas e nos oxihidróxidos de ferro e alumínio e, inclusive, adsorvido à matéria orgânica do solo através de pontes de cátions (UEHARA e GILLMAN, 1981; BARROW, 1983).

As reações de adsorção do P à colóides minerais contendo Fe e Al ocorrem em duas etapas (MEURER et al., 2004). A primeira, denominada complexo de esfera externa, é rápida e envolve apenas atração eletrostática entre o íon e a superfície de carga oposta do colóide, havendo presença de pelo menos uma molécula de água entre eles. O fosfato adsorvido neste processo é mais facilmente dessorvido (PARFITT, 1978). Em seguida, se as condições físico-químicas forem favoráveis, ocorre à segunda etapa do processo de adsorção, denominado complexo de esfera interna. Esta fase é mais lenta e ocorre, principalmente, em sítios de baixa cristalinidade e elevado desbalanço de cargas, que são mediadas pelo pH do solo. Nestas regiões, a adsorção se dá pela troca entre grupos $\text{OH}^{1/2+}$ ligados ao metal e H_2PO_4^- , formando ligações de diferentes tipos: monodentada, em que um oxigênio do fosfato é ligado ao metal; bidentada, em que dois oxigênios são ligados ao metal; e binucleadas, em que dois oxigênios do fosfato são ligados a dois átomos do metal. A energia de ligação é crescente para os compostos monodentados, bidentados e binucleados e a possibilidade de dessorção do fosfato aumenta na ordem inversa (FIXEN e GROVE, 1990).

O outro grupo é o P orgânico, que ocorre no solo, primeiramente, nas formas orgânicas presentes na biomassa microbiana, já que na pedogênese, é o primeiro representante da biota capaz de assimilar fosfatos que estão sendo liberados do intemperismo de rochas e minerais e incorporar na sua estrutura. Em seguida, plantas que passam a existir no sistema se aproveitam dos fosfatos liberados de minerais primários bem como de produtos de decomposição microbiana. Desta forma, o P do solo é oriundo dos resíduos vegetais depositados no solo, do tecido microbiano e dos produtos de sua decomposição (MARTINAZZO et al., 2007). De acordo com o maior ou menor grau de estabilidade destes compostos, são enquadrados como fosfatos lábeis e não-lábeis. A fração lábil é representada pelo conjunto de compostos fosfatados capazes de repor rapidamente à solução do solo,

quando ele é absorvido por plantas ou por microrganismos. Por isso, as frações mais lábeis são dependentes do grau de intemperização do solo, da mineralogia, da textura, do teor de matéria orgânica, das características físico-químicas, da atividade biológica e da vegetação predominante (WALKER e SYERS, 1976; STEWART e SHARPLEY, 1987; CROSS e SCHLESINGER, 1995). A fração não-lábil ou recalcitrante é definido como o P que está retido fortemente aos coloides do solo a ponto de não poder ficar disponível na solução do solo (PAVINATO et al., 2010).

Com a adição de fertilizantes fosfatados, há o acúmulo de P em formas inorgânicas e orgânicas com diferentes graus de energia de ligação, embora o acúmulo das formas inorgânicas seja mais pronunciado (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2001). O sistema plantio direto proporciona acúmulo de P na camada superficial do solo (SELLES et al., 1997) devido às aplicações anuais que em geral, situam-se até 15 cm de profundidade, e pela manutenção dos restos culturais na superfície, que ao se decomporem liberam P nesta camada. Esse comportamento é consequência da aplicação de fertilizantes na camada superficial, ausência de revolvimento do solo e diminuição das taxas de erosão. A adsorção do P ocorre primeiramente nos sítios mais ávidos (de menor labilidade) e, posteriormente, o fósforo remanescente é redistribuído em frações retidas com menor energia e de maior disponibilidade às plantas (RHEINHEIMER et al., 2000).

As plantas absorvem P nas formas aniônicas H_2PO_4 e HPO_4^{2-} . Uma vez que as plantas absorvem P da solução do solo, a fase sólida passa a ser a fonte potencial do nutriente e sua liberação pode ocorrer por meio de processos de dessorção e solubilização, para o P inorgânico adsorvido e precipitado, respectivamente. Além disto, pode ocorrer também a mineralização, no caso do fósforo orgânico, sendo que esses processos dependem de diversos fatores do solo, do ambiente e da planta.

A redistribuição das formas de P pode ocorrer principalmente de duas formas. A primeira ocorre em locais onde a aplicação de fertilizantes fosfatados é menor do que a exportação de P pela cultura, onde ocorrerá uma diminuição dos estoques de P ao longo do tempo, tanto das formas inorgânicas como das formas orgânicas (BECK e SANCHEZ, 1994). Assim, a contribuição das formas orgânicas ganha importância em solos intemperizados e com baixa taxa de adição (BECK e SANCHEZ, 1994; GATIBONI et al., 2007). A segunda é em solos em que as aplicações de P ocorrem acima da capacidade de absorção das plantas. Seja pelo

uso de fórmulas de fertilizantes desbalanceadas, aplicadas em quantidades inadequadas, que não levam em consideração os resultados das análises de solo, ou pela incorreta interpretação dos resultados analíticos, onde há assim, um incremento das formas de P, inicialmente nas formas inorgânicas e, posteriormente, tanto nas formas inorgânicas como orgânicas (SCHMITT et al., 2013). Nesses locais onde as aplicações de P são acima da capacidade de absorção pelas plantas, o P_i é a fração de P que mais contribui na nutrição das plantas, tanto em solos pouco, como altamente intemperizados (GUO e YOST, 1998; GUO et al., 2000).

O acúmulo de P no solo está associado principalmente a aplicações de fertilizantes orgânicos e minerais. Naturalmente, a camada superficial do solo apresenta maiores teores de P devido ao sistema plantio direto, que propõe o não revolvimento do solo, a aplicação de fertilizantes na superfície do solo e a ciclagem de nutrientes. Muitos estudos têm mostrado acúmulo de P no solo no cultivo de plantas anuais (CIAMPITTI, et al., 2011). Esse acúmulo tem se pronunciado no solo principalmente pelas frequentes adubações realizadas no plantio, em casos onde os produtores não realizam um monitoramento dos teores de nutrientes disponíveis no solo e no tecido, para avaliar a quantidade adequada de nutrientes a serem fornecidos via fertilizantes. Esses acúmulos geralmente são acima dos teores originais dos solos, chegando a causar acúmulo em torno de 150 vezes o teor original do solo, nas camadas de 0-10 cm de profundidade (COSTA et al., 2009). Esses maiores teores de P no solo podem causar perdas de produtividade das culturas e perdas de P para ambientes aquáticos, tanto por lixiviação como por escoamento superficial, principalmente em solos com textura arenosa (GATIBONI et al., 2015).

Teores elevados de fósforo nas diversas frações aumentam a quantidade de P presente na solução do solo, mas não quer dizer que aumentarão a produtividade da soja, pois os teores no solo estão acima do nível crítico de fósforo para a cultura da soja. O teor crítico é o limite inferior da faixa “alto”, em que normalmente obtêm-se rendimentos próximos à máxima eficiência econômica das culturas. Já os teores na faixa “muito alto” podem, eventualmente, ser excessivos e restringir o rendimento das culturas. O nível adequado corresponde à faixa “alto” que é o objetivo do sistema de recomendação de fertilizantes (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC, 2016).

A exportação de P pelos grãos é alta, 15 kg ha^{-1} , por tonelada de grão (INPI, 2017). Por isso, em solos com os teores de P abaixo do adequado, a recomendação é corrigir o solo com adubação fosfatada até o nível adequado e, em seguida, manter o teor de P, baseando na recomendação de fertilizantes em análise do teor de P no solo, aplicando fertilizantes conforme a expectativa de rendimento e exportação de produtividade (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC, 2016). A adsorção de Cu pode afetar a adsorção de P, e vice-versa. Além da alta especificidade entre o grupo funcional e o metal e a tendência à irreversibilidade, como resultado da adsorção de metais catiônicos (Cu^{2+}) existe a liberação de íons H^+ (quando há diminuição do pH) e a superfície do colóide torna-se mais positiva, implicando em aumento na capacidade de adsorção de P. O fósforo por sua vez, é adsorvido por complexo de esfera interna no solo, mas essa reação é denominada de troca de ligantes, devido ao deslocamento de OH^- ou H_2O coordenada na superfície do colóide pelo ânion fosfato. Como resultado, em solos ácidos, ricos em óxidos, o aumento do pH torna a superfície do colóide mais negativa, o que favorece a adsorção de metais catiônicos como o Cu (PÉREZ-NOVO et al., 2009).

Além disso, a adição de fosfato aumenta a adsorção de Cu em solos ácidos, principalmente devido a um aumento de pH que pode favorecer a formação, na solução, de espécies prontamente-sorvidas de Cu-P (CuHPO_4), que possuem maior afinidade pela superfície adsorvente do que o Cu sozinho (PÉREZ-NOVO et al., 2009). Por outro lado, na presença de P, o Cu pode agir como elementos de ligação entre o P e matéria orgânica do solo, aumentando a adsorção de P (PÉREZ-NOVO et al., 2011a).

Em locais com aplicação elevada de P e teores adequados de Cu no solo, os elevados teores de P podem ocasionar distúrbios no solo aumentando a adsorção de Cu (PÉREZ-NOVO et al., 2011a), diminuindo a absorção de Cu pelas plantas (TENG e TIMMER, 1990), possivelmente pela interação Cu-P na superfície dos oxihidroxidos de Fe e Al (PÉREZ-NOVO et al., 2011b).

Em alguns solos do estado do Rio Grande do Sul encontramos atualmente teores muito elevados de fósforo, devido à falta de informação e generalização por partes dos produtores e consultores, que os solos brasileiros apresentavam teores muito baixo de P e conseqüentemente o uso recorrentes de adubos fosfatados no solo, ao longo dos anos e cultivos, sem um monitoramento através de uma análise

química e análise foliar, fazendo com que encontramos solos com altos teores de P, e assim, reduzindo a absorção de micronutrientes pelas plantas e consequentemente teores abaixo do adequado no tecido foliar.

Há relato de que a aplicação de doses de Cu interfere na absorção de nutrientes em solo ácido, pois verificaram que com dose de 50 mg kg^{-1} de Cu as plantas absorveram 2,91 e 2500 vezes menos P e Zn respectivamente em relação ao solo sem aplicação de Cu (AZEEZ et al., 2015). Por isso, para o adequado crescimento das plantas de soja é necessário o fornecimento de nutrientes de forma balanceada, evitando as perdas de nutrientes e os distúrbios nutricionais. No solo, existe uma interação entre a dinâmica de adsorção do P nos coloides do solo e a adsorção de Cu, sendo que o aumento da adsorção de P contribui para o incremento na adsorção de Cu e vice-versa. No caso de adubações frequentes e em quantidades elevada de P, pode ocorrer um desbalanço nutricional das plantas, reduzindo a produtividade da cultura. O P pode precipitar com formas insolúveis de Cu, principalmente, tornando-os indisponíveis a absorção pelas plantas.

As mudanças das práticas de cultivo fez com que pudesse haver alterações no método de aplicação de fertilizantes e muitas vezes resultando em acumulação de P na superfície do solo. Interações de P com micronutrientes foram relatadas em uma grande variedade de culturas. Foram relatadas interações com P para boro, cobre, ferro, manganês, molibdênio e zinco. Os solos com altos teores de P devem ser monitorados, devido a possível interação com os micronutrientes. A interação P-Cu foi encontrada quando altos níveis de P acentuaram uma deficiência aguda de Cu em mudas cítricas (SULTENFUSS e DOYLE, 1999). Acredita-se que essa interação ocorra no local de absorção, possivelmente com precipitação de Cu na superfície da raiz. O excesso de Cu pode diminuir a absorção de fósforo (SULTENFUSS e DOYLE, 1999).

Para planejar o manejo da adubação fosfatada é indispensável relacionar o resultado da análise do solo com o enquadramento na sua classe de disponibilidade. As classes de disponibilidade são obtidas levando em consideração o teor do nutriente no solo e a produtividade das culturas. A máxima eficiência de uso de fertilizantes é obtida quando a denominada adubação de manutenção ou reposição é realizada sem que haja prejuízos para o estado de fertilidade do solo nem para a produtividade das culturas. Sousa et al. (2010), avaliando a eficiência da adubação

fosfatada encontraram valores de 94% quando o solo encontrava-se corrigido com P, em plantio direto, num sistema de rotação soja/milho/aveia.

O somatório de todos estes fatores que interferem na nutrição das plantas reforça o cuidado que os produtores precisam ter para o adequado desenvolvimento e produtividade da soja, principalmente quanto ao uso de fertilizantes fosfatados. Isto porque aplicações de fertilizantes acima do recomendado, pode trazer prejuízos para as produtividades e ocorrer um desbalanço entre os nutrientes nas plantas.

3 HIPÓTESE

Há resposta positiva da cultura da soja à aplicação de Cu, via foliar, quando o cultivo for conduzido sob aplicação de altas doses de P, em área com teores de P previamente muito alto.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Avaliar se a aplicação de Cu, via foliar, na cultura da soja é capaz de proporcionar incrementos na produtividade de grãos, em cultivos conduzidos em solos com altos teores de P.

4.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os componentes de rendimento (número de grãos por planta, número de legumes por planta, número de grãos por legume e massa de 1000 grãos);
- Avaliar a produtividade da cultura da soja;
- Quantificar o número de nódulos por planta e massa de nódulos secos;
- Determinar o teor foliar de Cu e P.
- Avaliar de maneira simplificada a análise econômica da aplicação de P e Cu.

5 Aplicação de cobre na cultura da soja em solos com altos teores de fósforo¹

5.1 Abstract

The availability of micronutrients to the plant is affected by various soil, microbial and environmental factors. The objective of this study was to evaluate if the application of Cu, via foliar, in the soybean crop is able to provide increases in grain yield, in cultures conducted in soils with high levels of P. The experiment was conducted from september 2015 to may of 2017, in the municipality of Pinhal Grande in a Typic Hapludalf. The experiment was installed in a randomized complete block design, in a factorial scheme (3x3), with four replications. The treatments were composed of three fertilization doses with P₂O₅ (0, 69 and 138 kg ha⁻¹) and three Cu doses (0, 10 and 20 g ha⁻¹ Cu), making a total of nine treatments. In the first crop (crop 2015/2016) the leaf content of Cu and P and the productivity were evaluated, and in the second crop (crop 2016/2017) the leaf content of Cu and P was evaluated, the nodulation, the components of yield and productivity. The application of phosphorus and foliar copper influenced positively the number of vegetables per plant, grains per plant, the mass of 1000 grains and the productivity of the soybean crop.

Key words: Productivity. Performance components. Leaf content. *Glycine max*

¹ Artigo elaborado de acordo com as normas da Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira.

5.2 Introdução

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja. Na safra 2016/2017 foram cultivados 33,8 milhões de hectares, totalizando uma produção de 113,9 milhões de toneladas, com uma produtividade média de 3.362 kg por hectare (Conab, 2017). O aumento da população, e conseqüente maior demanda por alimento, tem estimulado o cultivo da soja e a meta de obtenção de elevadas produtividades (Fao, 2017).

Os solos do estado do Rio Grande do Sul, originalmente apresentavam-se bem supridos em micronutrientes essenciais. Assim, desde a introdução da cultura da soja, no início da década de 1960, não se recomendava micronutrientes para adubação. Somente após sucessivos anos de extração desses nutrientes pelas crescentes produtividades, é que se tem observado uma maior frequência na ocorrência de respostas a adubação (Arantes & Souza, 1993; Sfredo et al., 1996; Hansel & Oliveira, 2016). A disponibilidade de micronutrientes para a planta é afetada por vários fatores do solo e ambiental. O material de origem e os processos envolvidos na formação dos solos, os quais determinam a capacidade de retenção de água, a aeração e a temperatura do solo, também influenciam na disponibilidade de micronutrientes às plantas. O equilíbrio entre os nutrientes no sistema solo-planta pode ser um fator limitante fundamental na disponibilidade dos nutrientes (Lindsay, 1991; Chaves et al., 2007; Prado, 2008; Marschner, 2012).

O cobre é um importante micronutriente relacionado ao crescimento, desenvolvimento e produtividade das plantas (Ibrahim & Faryal, 2014; Hansel & Oliveira, 2016), é absorvido pelas raízes na forma Cu^{2+} e como quelatos solúveis. Na planta, o cobre participa de inúmeras enzimas, atuando em praticamente todas as vias metabólicas do vegetal, especialmente no metabolismo de carboidratos, do nitrogênio e na síntese de lignina. Sua presença em grupos prostéticos permite que eles catalisem processos redox por transferência de elétrons (Ferreira & Cruz, 1991; Romheld & Marschner, 1991; Kirkby & Romheld, 2007). Várias proteínas contendo cobre são importantes nos processos de fotossíntese, respiração, desintoxicação dos radicais livres de superóxidos e lignificação (Marschner, 1995; Kerbauy, 2004). Aproximadamente 70% do Cu contido nas folhas estão situados nos cloroplastos (Malavolta, 2006; Taiz & Zeiger, 2009).

Já o fósforo, é um macronutriente essencial no metabolismo das plantas, desempenha papel importante na transferência de energia da célula, na respiração, além de ser componente estrutural dos ácidos nucléicos de genes e cromossomos, assim como de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolípidos (Bingham, 1963; Schachtman et al., 1998; Taiz & Zieger, 2009). Com isso, é necessário o uso da adubação fosfatada na cultura da soja (Raij et al., 2001).

Uma vez que os solos brasileiros apresentam, em condições naturais, baixa disponibilidade de fósforo (Raij, 1991; Piaia et al., 2002; Novais et al., 2007), torna-se necessária adição de fertilizantes fosfatados ao solo para o favorável desenvolvimento da cultura da soja (Tanaka & Mascarenhas, 1992; Novais & Smyth, 1999). Porém, devido à generalização e à falta de informação por parte de alguns produtores e consultores, dos teores de fósforo dos solos. Foram realizadas aplicações recorrentes de adubos fosfatados no solo durante vários anos e cultivos em altas doses, em alguns casos, sem o adequado monitoramento através de análise química do solo para o uso de critérios técnicos e uma correta nutrição das plantas, fazendo com que encontramos atualmente solos com altos teores de fósforo.

Quando a eficiência de uso do fósforo for menor que 100%, há acúmulo do nutriente no solo. Isso é o que ocorre com as adubações fosfatadas corretivas total ou gradual (Souza et al., 2004), em monocultivos de culturas de pouca eficiência como soja, trigo, feijão, arroz (Souza et al., 2010; Franchini et al., 2011) bem como em sistemas com adubação fosfatada acima do necessário, realidade frequente nos sistemas produtivos brasileiros (Cunha et al., 2011). Desta forma, esse balanço positivo de P no sistema leva ao acúmulo do nutriente no solo (Nunes et al., 2011).

Em locais com aplicação elevada de fósforo e teores adequados de cobre no solo, os elevados teores de P podem ocasionar distúrbios no solo aumentando a adsorção de Cu (Pérez-Novo et al., 2011a), diminuindo a absorção de Cu pelas plantas (Teng & Timmer, 1990), possivelmente pela interação Cu-P na superfície dos oxihidroxidos de Fe e Al (Pérez-Novo et al., 2011b). Além disso, a adição de P nos solos pode estimular o crescimento das plantas e, com isso, diluir a concentração de cobre nos tecidos. Ainda, seu aumento pode diminuir o transporte de Cu da raiz para a parte aérea (Loneragan et al., 1982; Araujo & Machado, 2006).

A adição de fosfato aumenta a adsorção de Cu em solos ácidos, principalmente devido a um aumento de pH que pode favorecer a formação de

espécies prontamente-sorvidas de Cu-P (CuHPO_4) na solução, que possuem maior afinidade pela superfície adsorvente do que o Cu isolado (Pérez-Novo et al., 2009). A adição de P ao solo pode diminuir a absorção de Cu devido a alteração do pH da rizosfera. Com a dissolução dos fertilizantes fosfatados são liberados íons H^+ , e a absorção de Cu é sensível as variações do pH. Essa alteração de pH também pode promover a precipitação de Cu nos componentes do solo, comprometendo sua disponibilidade às plantas (Loneragan & Webb, 1993; Araujo & Machado, 2006). Na presença de P, o Cu pode agir como elemento de ligação entre o P e matéria orgânica do solo, aumentando a adsorção de P (Pérez-Novo et al., 2011a).

A resposta agrônômica da soja à adubação com micronutrientes tem sido variada segundo os estudos realizados. Isto ocorre devido aos diferentes solos estudados, do micronutriente em questão, das condições ambientais e das cultivares utilizadas. Para alguns nutrientes, quase não há estudos realizados no Brasil. Poucos estudos têm sido realizados com relação ao cobre para a cultura da soja nos solos brasileiros (Inocêncio, et al. 2012).

Uma das alternativas tecnológicas para aumentar a produtividade está baseada no adequado suprimento de nutrientes às plantas. Porém, dispõe-se de poucas pesquisas que apontem os fatores que determinam a produtividade da soja diante de aplicações de cobre em solos com teores muito altos de fósforo. Dessa forma, objetivou-se avaliar se a aplicação de Cu, via foliar, na cultura da soja é capaz de proporcionar incrementos na produtividade de grãos, em cultivos conduzidos em solos com altos teores de P.

5.3 Material e Métodos

O experimento foi conduzido de setembro de 2015 a maio de 2017, na propriedade Santo Antônio, localidade Rincão do Leão, no município de Pinhal Grande - RS. As coordenadas do local são: latitude: 29 14' 08" S; longitude: 53 26' 09" W e com altitude média de 423 metros. O município apresenta clima subtropical sem estação seca definida (Cfa), segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 17,6°C (Moreno, 1961). Os dados de precipitação pluvial mensal ocorrido durante o período experimental estão apresentados na Figura 2.

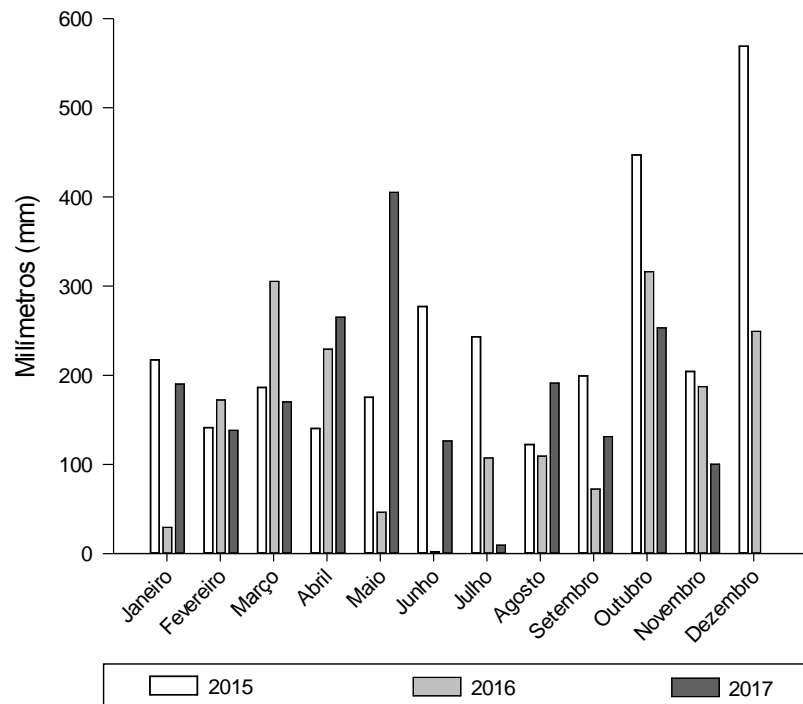


Figura 2. Dados de precipitação pluvial mensal ocorrido durante o período experimental, nas safras 2015/2016 e 2016/2017.

O solo foi classificado como Argissolo Vermelho Distrófico (Embrapa, 2013). Os resultados da análise química do solo antes da semeadura foram coletados na profundidade de 0-10 cm, conforme indicado pela CQFS-RS/SC (2016), visto que se trata de uma área de plantio direto consolidado. As amostras coletadas foram secas em estufa a 65°C, moídas e peneiradas em malha de 2,0 mm. Os atributos analisados foram: o teor de argila determinada pelo método do densímetro, pH em água determinado por meio de potenciometria, fósforo (P) e potássio (K) disponíveis (Mehlich⁻¹) determinados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente, cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺) e alumínio (Al³⁺), extraídos com solução de KCl 1,0 mol L⁻¹. O Ca²⁺ e o Mg²⁺ foram determinados por meio de espectrofotometria de absorção atômica e o Al³⁺ por meio de titulação com NaOH 0,0125 N. Calculou-se a CTC efetiva e determinou-se o teor de matéria orgânica do solo (MO) pela oxidação do carbono. O enxofre (S) disponível foi determinado por colorimetria, cobre (Cu) e zinco (Zn) disponíveis (Mehlich⁻¹) foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. O manganês (Mn) extraído pela solução de KCl 1,0 mol L⁻¹, acidificada com HCl 2%, e determinado por espectrofotometria de absorção atômica

e o Boro (B) disponível, foi extraído por água quente determinado por colorimetria, conforme procedimentos descritos por Tedesco et al. (1995). A determinação de H+Al, foi realizada através do método SMP. Determinou-se ainda a saturação por Al, saturação por Bases e a CTC_{pH7} ($cmol_c dm^{-3}$). Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Características químicas do solo na profundidade de 0-10 cm antes da instalação do experimento.

MO	Argila	pH	SMP	CTC	CTC_{pH7}	Al	Ca	Mg	H+Al	
$g kg^{-1}$		$cmolc dm^{-3}$								
21	226	5,6	6,2	6,6	10,2	0,1	4,5	1,8	3,6	
P	K	S	Zn	Cu	B	Mn	Saturação (%)			
$mg dm^{-3}$							Bases	Al		
60,2	111,7	12,7	0,9	0,5	0,2	21,6	62,2	1,2		

Na Tabela 2, estão representadas as classes de interpretação para a disponibilidade de P e Cu no solo conforme o Manual de Adubação e de Calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina de 2004 (Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2004) e Manual de Calagem e Adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina de 2016 (Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016), pois ocorreu a atualização do manual durante a realização do experimento. O teor de P no solo para o manual de 2004 e após sua atualização em 2016 enquadra-se na classe muito alto. A classificação do teor de Cu no solo também não foi alterada após a atualização do manual, permanecendo na classe alto.

Tabela 2. Classes de interpretação para a disponibilidade de P e Cu no solo para RS e SC.

Interpretação	2004	2016	2004 e 2016
	Classe conforme o teor de argila*		Teor de Cu (mg dm ⁻³)
	3		
Teor de P (mg dm ⁻³)			
Muito baixo	≤ 4,0	≤ 6,0	-
Baixo	4,1 - 8,0	6,1 - 12,0	< 0,2
Médio	8,1 - 12,0	12,1 - 18,0	0,2 - 0,4
Alto	12,1 - 24,0	18,1 - 36,0	> 0,4
Muito alto	> 24,0	> 36,0	-

*Teor de argila: classe 3 = 40 a 21%

Fonte: CQFS RS/SC, 2004 e 2016.

Para execução do experimento foi utilizado o delineamento experimental blocos ao acaso, em esquema fatorial (3x3), com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos com três doses de adubação com P₂O₅ e três doses de Cu, perfazendo um total de nove tratamentos.

As três doses de fósforo testadas foram: 0, 69 e 138 kg ha⁻¹ de P₂O₅ caracterizando respectivamente, testemunha, dose recomendada de adubação com base na análise química do solo e expectativa de rendimento da cultura para 4,62 T ha⁻¹ e o dobro da dose recomendada. Em relação ao cobre as doses testadas foram: 0, 10 e 20 g ha⁻¹ de Cu, aplicadas via foliar no estágio fenológico V6 da cultura da soja. Como fonte de nutrientes, utilizou-se o superfosfato triplo (46% P₂O₅) para P e cobre quelatado com EDTA para Cu.

As parcelas correspondem a 6 metros de largura por 6 metros de comprimento (36 m²), apresentando aproximadamente 13 linhas com espaçamento de 0,45 m. A área útil de cada parcela foi de 6,75 m², composta pelas cinco linhas centrais com três metros de comprimento, desconsiderando 3 metros (1,5 m de cada lado) das extremidades como bordaduras.

A área é cultivada desde o ano 1954, quando ocorreu a transformação do campo nativo em lavoura para cultivo da soja. Desde então se adotou o sistema convencional, com revolvimento do solo. A partir do ano de 1994 implantou-se o sistema plantio direto, o qual é realizado até os dias atuais. A cultivar de soja utilizada nos 2 cultivos (safra 2015/2016 e 2016/2017) foi a NA 5909 RR, com ciclo de 130 dias da emergência à colheita, hábito de crescimento indeterminado e

considerada de ciclo precoce. A população média de plantas estabelecidas foi aproximadamente 266 mil plantas ha^{-1} , semeadas na safra 2015/2016 no dia 27/10/2015 e na safra 2016/2017 no dia 09/11/2016. As sementes receberam tratamento com inseticida e fungicidas, respectivamente Fipronil (250 g L^{-1}) e Piraclostrobina (25 g L^{-1}) + Tiofanato Metílico (225 g L^{-1}), na dose de 200 ml para cada 100 kg de semente.

Para o controle de plantas daninhas e pragas foram realizados os manejos conforme a necessidade e nível de dano para a cultura. Para o controle de doenças foi realizado as aplicações de fungicidas de maneira preventiva, repetindo-se novamente a aplicação após o término do período residual.

No primeiro cultivo (safra 2015/2016) foi avaliado o teor foliar de Cu e P e a produtividade das parcelas. No segundo cultivo (safra 2016/2017) foi avaliado o teor foliar de Cu e P, a nodulação, os componentes de rendimento e a produtividade das parcelas.

A coleta do material vegetal para análise foliar foi realizada no florescimento pleno (estádio fenológico R2), retirando-se as terceiras folhas do terço superior da haste principal de 30 plantas escolhidas aleatoriamente dentro da parcela útil. Após a coleta, foram retirados os pecíolos das folhas e estas foram lavadas e secas a 65°C , em estufa de circulação fechada de ar, até atingir massa constante, sendo em seguida moídas.

Para a determinação do teor de Cu, as folhas foram submetidas à digestão nitro-perclórica (Tedesco et al., 1995), e posteriormente, as amostras foram encaminhadas para análise via espectrometria de emissão óptica com plasma induzido (ICP OES). Para a determinação do teor de P, as folhas foram submetidas à digestão sulfúrica (Tedesco et al., 1995) sendo a quantificação dos teores de fósforo realizada por espectrometria de emissão óptica com plasma induzido (ICP OES).

A avaliação da nodulação, também foi realizada no estágio de pleno florescimento, em oito plantas por parcela. As plantas foram coletadas com o auxílio da pá de corte. Posteriormente foram separadas as raízes, os nódulos e o solo da amostra, com auxílio de peneira de malha de 3 mm e água para limpeza do solo aderido às partes vegetais. Após, realizou-se a contagem do número de nódulos por planta que foram identificados e acondicionados em sacos de papel. Em etapa

seguinte, as amostras foram pesadas e levadas para secagem em estufa a 65°C até obter massa constante e aferiram-se suas massas.

Na colheita da cultura (maturação fisiológica) avaliou-se a produtividade e os seguintes componentes de produção: número de grãos por planta, número de legumes por planta, número de grãos por legume e massa de 1000 grãos.

A determinação da produtividade foi realizada por meio da colheita de toda a parcela útil, corrigindo para zero o teor de impurezas e 13% de umidade. Posteriormente, os resultados foram estimados para kg ha⁻¹. Para a avaliação do número de grãos e número de legumes por planta, foram coletadas 8 plantas da parcela experimental, retirando-se e contando-se todos os legumes de cada planta e os grãos de cada legume. A massa de 1000 grãos foi determinada por pesagem de 4 repetições por parcela de acordo com Brasil (1992).

Os resultados foram submetidos a análise de variância e, quando obtida significância para determinada fonte de variação, foi realizado o teste Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro com auxílio do software SISVAR (Ferreira, 2011).

A análise econômica foi realizada no segundo cultivo (safra 2016/2017), o cálculo dos custos com a aplicação de fósforo e cobre foi efetuado levando-se em consideração os valores de compra dos produtos. Os preços dos fertilizantes tomados como referência, em reais por tonelada para o P na fonte de nutriente de superfosfato triplo e reais por quilograma para o Cu na fonte de cobre quelatado com EDTA, adquiridos no mês de agosto de 2016. A receita obtida com a aplicação de P e Cu foi realizada levando em conta o valor de venda da soja no mês de maio de 2017, mês no qual, normalmente, o produtor realiza a comercialização da sua produção na região Sul.

5.4 Resultados

Na safra 2015/2016 houve interação entre as doses de P e Cu para a produtividade. Já no segundo ano de cultivo (2016/2017) houve efeito isolado do fósforo e do cobre na produtividade da cultura. Para os componentes de rendimento que foram avaliados somente no segundo cultivo, como número de grãos por planta, número de legumes por planta e massa de 1000 grãos, houve efeito isolado da aplicação de doses de P e Cu. Número de grãos por legume, número de nódulos por planta e massa de nódulos secos, não apresentaram diferença estatística para os

tratamentos de P e Cu utilizados. Para os teores foliares de P e Cu, no primeiro ano de cultivo, apenas o teor foliar de Cu apresentou efeito significativo para os tratamentos com adição de P. No segundo ano de cultivo, não foi verificado diferença estatística para os teores foliares de fósforo e cobre.

5.4.1 Produtividade da cultura da soja

No primeiro cultivo, safra 2015/2016, houve interação P x Cu na produtividade da soja (Figura 3), sendo que a maior produtividade de soja ocorreu na dose 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 20 g ha⁻¹ de Cu, com uma média de 4446 kg ha⁻¹. Houve aumento de produtividade de grãos na cultura da soja com o incremento na dose de P₂O₅ nas condições em que não foi aplicado Cu e em percentuais de 2,5 e 1,57% com as doses de 69 e 138 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente. Por sua vez, houve incremento na produtividade de grãos com a aplicação de Cu quando não foi aplicado P₂O₅, e com a aplicação de 138 kg ha⁻¹ de P₂O₅, com incremento de produtividade de 1,93 e 1,43% com as doses de 10 e 20 g ha⁻¹ de Cu, respectivamente. Com a aplicação de 10 g ha⁻¹ de Cu, a produtividade média variou entre 4384 a 4413 kg ha⁻¹. Já, com a aplicação de 20 g ha⁻¹ de Cu a maior produtividade ocorreu sem a aplicação de P₂O₅, enquanto que nas doses 69 e 138 kg ha⁻¹ de P₂O₅ houve uma diminuição de produtividade, respectivamente, 1,49 e 1,83%.

No segundo cultivo, na safra 2016/2017, não houve interação P x Cu, mas apenas resposta positiva no incremento na produtividade de grãos com a aplicação de P ou Cu, independente da dose (Figura 4). Com a aplicação de 69 e 138 kg ha⁻¹ de P₂O₅, as produtividades foram de 4516 e 4500 kg ha⁻¹, respectivamente, ou seja, apresentaram incrementos de 1,53 e 1,17%. Por sua vez, as aplicações de Cu promoveram incrementos na produtividade de grãos de soja de 3,19 e 2,44%, ou seja, atingiram 4546 e 4513 kg ha⁻¹, respectivamente, com as doses de 10 e 20 g ha⁻¹.

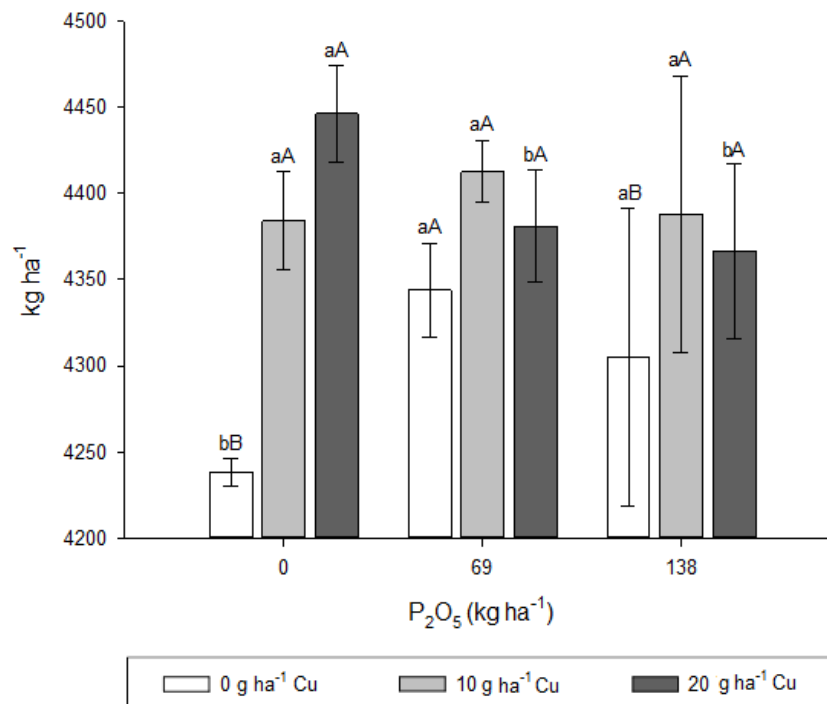


Figura 3. Produtividade de grãos da cultura da soja na safra 2015/2016 em solos com altos teores de fósforo submetido a aplicações de fósforo e cobre. Letras minúsculas comparam doses de P em cada nível de Cu, enquanto que letras maiúsculas comparam doses de Cu em cada nível de P e quando diferem é a 5% de probabilidade de erro.

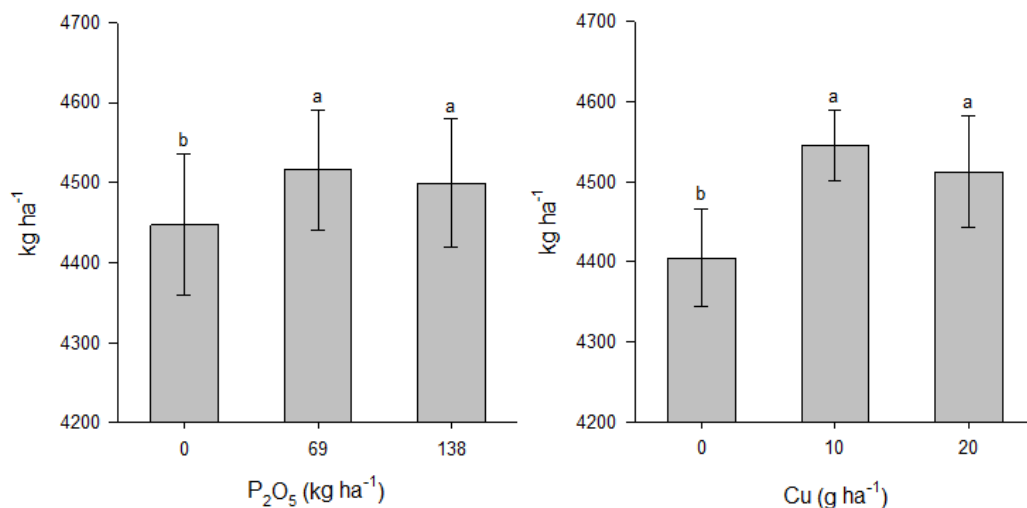


Figura 4. Produtividade de grãos da cultura da soja na safra 2016/2017 em solos com altos teores de fósforo submetido a aplicações de fósforo e cobre. Médias acompanhadas pela mesma letra não diferem pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

5.4.2 Componentes de rendimento

No segundo cultivo, safra 2016/2017, foram determinados os componentes de rendimento da cultura da soja. Número de grãos por planta e número de legumes por planta apresentaram efeito isolado para as doses de P e Cu (Figura 5). Os resultados são coerentes e ajudam a explicar o que foi observado na produtividade de grãos (Figura 4), pois houve resposta nos componentes de rendimento número de grãos e legumes por planta (Figura 5), bem como na massa de 1000 grãos (Figura 6) à aplicação de P_2O_5 e Cu, independente da dose. Com a aplicação das doses de 69 e 138 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 o número de grãos por planta aumentou atingindo 115 e 114, respectivamente, enquanto que o número de legumes foi semelhante e de 53 (Figura 5). Enquanto isso, as doses de 10 e 20 $g\ ha^{-1}$ de Cu, proporcionaram incremento no número de grãos por planta, que atingiram 116 e 115 e de legumes por planta que aumentou para 54 e 53, respectivamente.

A massa de 1000 grãos também respondeu positivamente à aplicação das doses de 69 e 138 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 , pois com ambas as doses atingiram 156 gramas (Figura 6). A massa de 1000 grãos parece ser um componente de rendimento mais constante porque responderam à aplicação e atingiram uma massa de 156 gramas com as doses de 10 e 20 $g\ ha^{-1}$ de Cu, respectivamente. Por outro lado, o número de grãos por legume não foi afetado pelos tratamentos (Tabela 3).

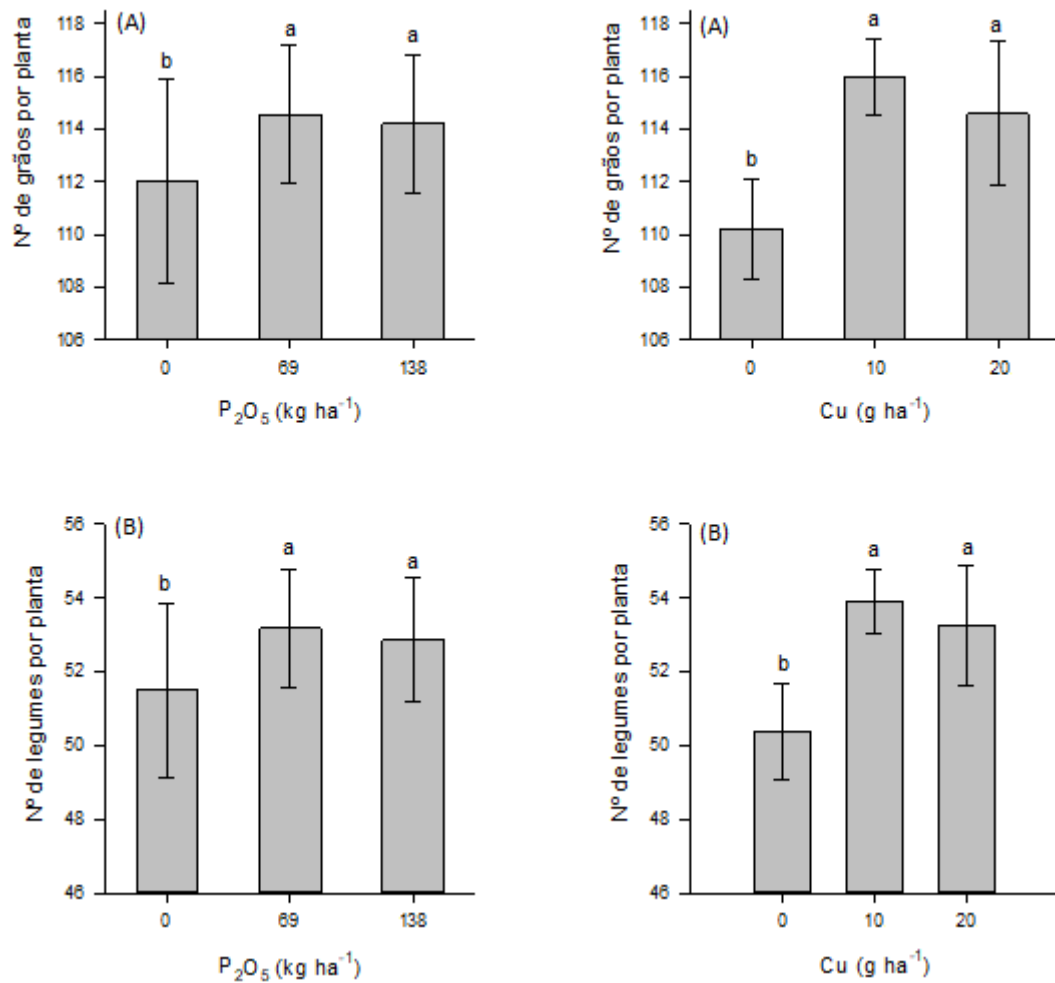


Figura 5. Número de grãos por planta (A) e legumes por planta (B) na safra 2016/2017 em solos com altos teores de fósforo submetido a aplicações de fósforo e cobre. Médias acompanhadas pela mesma letra não diferem pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

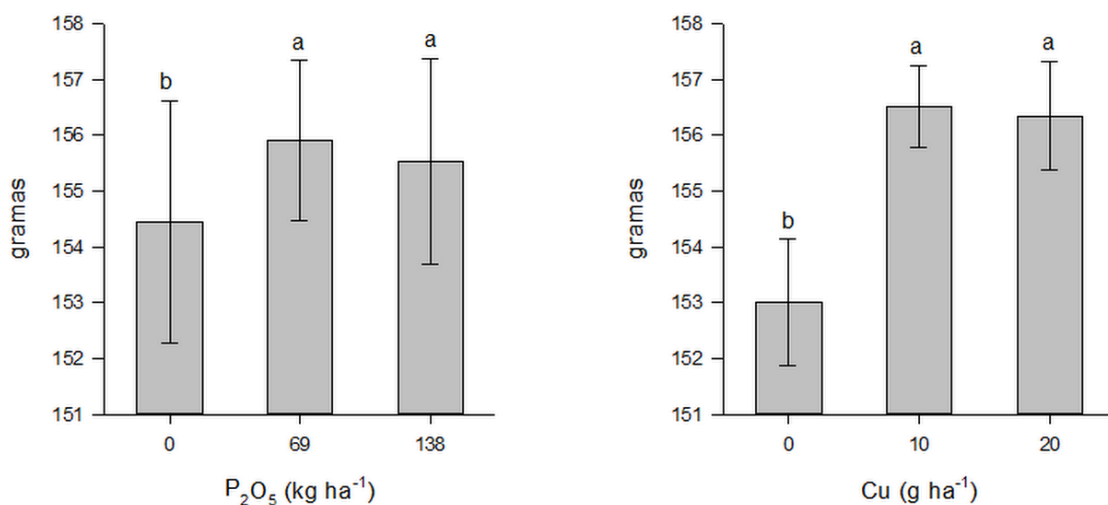


Figura 6. Massa de 1000 grãos na safra 2016/2017 em solos com altos teores de fósforo submetido a aplicações de fósforo e cobre. Médias acompanhadas pela mesma letra não diferem pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

Tabela 3. Número de grãos por legume na safra 2016/2017 em solos com altos teores de fósforo.

Número de grãos por legume			
P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Cu (g ha ⁻¹)		
	0	10	20
0	2,17*	2,15*	2,15*
69	2,20*	2,15*	2,15*
138	2,20*	2,17*	2,15*

* (P < 0,05), ns= não significativo.

5.4.3 Nodulação da soja

O número de nódulos por planta e massa de nódulos secos, avaliados na safra 2016/2017, não apresentaram efeito significativo com a análise estatística realizada para as doses de P e Cu (Tabela 4).

Tabela 4. Número de nódulos por planta e massa de nódulos secos na soja na safra 2016/2017.

Número de nódulos por planta			
P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Cu (g ha ⁻¹)		
	0	10	20
0	30,50*	32,25*	30,75*
69	31,25*	31,25*	31,25*
138	31,25*	32,00*	31,50*
Massa de nódulos secos			
P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Cu (g ha ⁻¹)		
	0	10	20
	g planta ⁻¹		
0	0,17*	0,17*	0,15*
69	0,16*	0,16*	0,17*
138	0,16*	0,16*	0,16*

* (P < 0,05), ns= não significativo.

5.4.4 Cu e P no tecido foliar da soja

No primeiro cultivo, safra 2015/2016, não houve interação P x Cu quanto aos teores de P e Cu no tecido, mas apenas uma resposta negativa da aplicação de P no teor de Cu no tecido, embora a análise estatística não tenha evidenciado diferença da testemunha e onde foi aplicada a dose de 69 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Figura 7).

No segundo cultivo, safra 2016/2017, as variáveis foliar do teor de P e Cu não apresentaram efeitos significativos com a análise estatística realizada (Tabela 5).

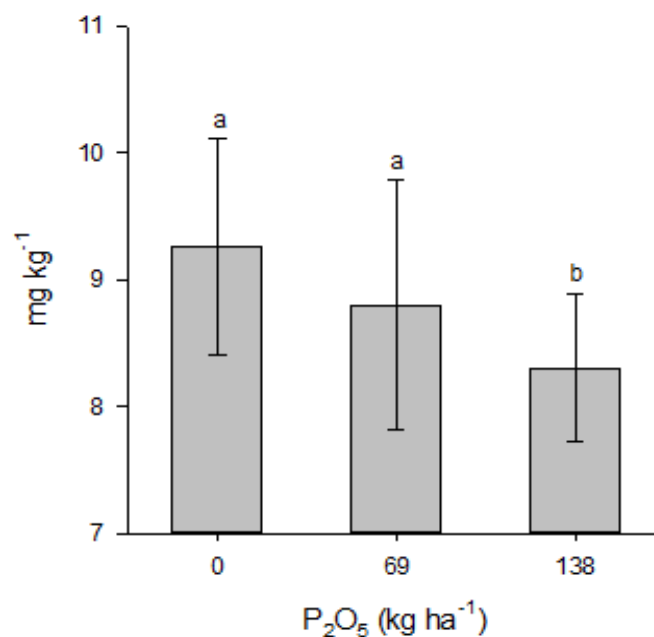


Figura 7. Teor foliar de cobre na safra 2015/2016 em solos com altos teores de fósforo submetido a aplicações de fósforo. Médias acompanhadas pela mesma letra não diferem pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

Tabela 5. Teor foliar de fósforo e cobre na cultura da soja, no primeiro cultivo (2015/2016) e segundo cultivo (2016/2017).

Teor foliar de fósforo (1º Cultivo)				Teor foliar de cobre (1º Cultivo)			
P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Cu (g ha ⁻¹)			P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	mg kg ⁻¹		
	0	10	20		g kg ⁻¹		
0	3,17*	3,10*	3,09*	0	9,26 a		
69	3,26*	3,09*	2,93*	69	8,80 a		
138	3,30*	3,06*	3,16*	138	8,30 b		
Teor foliar de fósforo (2º Cultivo)				Teor foliar de cobre (2º Cultivo)			
P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Cu (g ha ⁻¹)			P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Cu (g ha ⁻¹)		
	0	10	20		mg kg ⁻¹		
0	3,06*	3,09*	3,12*	0	9,30*	9,77*	10,15*
69	3,30*	3,39*	3,34*	69	9,33*	8,32*	10,27*
138	3,41*	3,32*	3,35*	138	8,92*	9,55*	9,80*

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott ($P < 0,05$). *ns= não significativo.

5.4.5 Análise econômica

No segundo cultivo, safra 2016/2017, foi determinada a análise econômica da aplicação de fósforo e cobre (Tabela 6). Com a aplicação de fósforo as produtividades de grãos foram de 4516 e 4500 kg ha⁻¹, com a aplicação de 69 e 138 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente, ou seja, representou um incremento de 1,53 e 1,17% na produtividade de grãos, aumentando 68 e 52 kg ha⁻¹ em relação à testemunha. Por sua vez, com as aplicações de cobre as produtividades de grãos foram de 4546 e 4513 kg ha⁻¹, obtidas com a aplicação de 10 e 20 g ha⁻¹ Cu, representando um incremento de 3,19 e 2,44%, respectivamente, aumentando em 141 e 108 kg ha⁻¹ em relação à testemunha. A receita obtida com a aplicação de P e Cu foi realizado levando em conta o valor de venda da soja de R\$ 62,00 reais por saca de 60 kg, no mês de maio de 2017.

Tabela 6. Viabilidade econômica, em reais, da aplicação de P e Cu na produtividade de grãos da soja em solos com altos teores de fósforo, quando comparada com a testemunha, na safra 2016/2017*.

Tratamento	Custo da aplicação dos fertilizantes**	Acréscimo no retorno econômico	Retorno líquido
		R\$ ha ⁻¹	
69 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	201,00	70,26	-130,74
138 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	402,00	53,73	-348,27
10 g ha ⁻¹ Cu	2,50	145,70	143,20
20 g ha ⁻¹ Cu	5,00	111,60	106,60

*Foi considerado o preço médio da saca de 60 kg de soja de R\$ 62,00 reais, em maio de 2017.

**Considerado o preço dos produtos comerciais Superfosfato triplo Yara = R\$ 1.340,00 reais T⁻¹; Kellus Copper = 35,00 reais kg⁻¹.

5.5 Discussão

5.5.1 Produtividade da cultura da soja

No presente estudo observou-se que a produtividade no primeiro cultivo (safra 2015/2016) variou em função das doses aplicadas de fósforo e cobre. As plantas expostas aos tratamentos de Cu e P, apresentaram aumento de produtividade. Plantas com o tratamento, nas doses de 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 20 g ha⁻¹ de Cu, apresentaram a maior produtividade, enquanto que quando não ocorreu aplicação de Cu e P houve redução da produtividade, assim como, as plantas expostas a doses altas de fósforo mostraram tendência à redução da produtividade. O Cu é um elemento essencial para o crescimento das plantas e tem funções importantes em muitos processos fisiológicos, como a fotossíntese, a respiração, a distribuição de carboidratos, a redução do N, e o metabolismo de proteínas (Kerbaui, 2004; Yruela, 2005), assim em solos com teor muito alto de fósforo disponível, seria eficiente à aplicação de Cu na cultura da soja, pois o P pode aumentar a adsorção de Cu no solo (Sarioglu et al., 2005), e, conseqüentemente reduzir a disponibilidade de cobre na solução do solo (Liu et al., 2007). Foi o que encontramos nesse estudo, houve incremento na produtividade de grãos na cultura da soja com a aplicação de Cu quando não foi aplicado P₂O₅, indicando um possível efeito que o P aumenta a adsorção de cobre no solo, diminuindo assim a disponibilidade de cobre para as plantas. Para Giroto et al. (2010) a biodisponibilidade e a mobilidade de elementos

químicos, como o cobre e o fósforo são dependentes da sua concentração na solução, da natureza da associação com outras espécies iônicas solúveis e da habilidade do solo em fornecê-los para a solução.

Após a adição de 138 kg ha^{-1} de P_2O_5 , para as doses de Cu testadas foi observado incremento de produtividade da cultura da soja, evidenciando que em solos com teor muito alto de fósforo e que foram aplicadas elevadas doses de fósforo há uma resposta positiva da aplicação de cobre para a cultura. Este comportamento pode estar relacionado com o efeito de interação dos nutrientes. Com a aplicação de Cu, o mesmo pode interagir com muitos nutrientes no solo alterando sua disponibilidade na solução do solo, sendo com o fósforo uma das mais importantes (Abreu et al., 2001). A interação do íon fosfato pode interferir na solubilidade dos elementos metálicos, formando precipitados pouco solúveis e diminuindo a concentração do íon em solução (Camargo et al., 2001; Sfredo, 2008). Isso nos mostra, que em solos com teores muito altos de fósforo, as adubações frequentes e em quantidades elevadas podem ocasionar redução da produtividade, devido ao desbalanço entre os nutrientes. Pois, no solo existe uma interação entre a dinâmica de adsorção do P nos coloides do solo e a adsorção de Cu, sendo que o aumento da adsorção de P contribui para o incremento na adsorção de Cu, bem como a adsorção deste metal contribui para o aumento da adsorção de P. Estando em concordância com os estudos de Sultenfuss & Doyle (1999), que encontraram interações positivas de P com Cu, eles estudaram a acumulação de nutrientes na cultura do milho, que indicou que altas doses de P pode reduzir a nutrição de Cu nas plantas. Na dose de 0 kg ha^{-1} de P_2O_5 e Cu foi obtido uma produção de 131 sacos ha^{-1} , já quando foi aplicado 80 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 20 g ha^{-1} de Cu foi obtido a produção máxima de 175 sacos ha^{-1} , segundo eles, essa interação ocorre no local de absorção, possivelmente com precipitação de Cu na superfície da raiz. Em outros estudos relatados, o P aplicado reduziu o efeito de níveis tóxicos de Cu, e verificaram que o excesso de Cu pode diminuir a absorção de P.

Trabalhos têm mostrado acúmulo de P no solo tanto com cultivo de plantas anuais (Ciampitti et al., 2011) como com plantas perenes (Brunetto et al., 2013; Schmitt et al., 2014). Esses acúmulos tem se pronunciado no solo principalmente pelas frequentes adubações realizadas na semeadura de verão e nas culturas de inverno. Aliado a isso, muitos casos, os produtores vem realizando aplicações recorrentes de adubos fosfatados no solo durante vários anos e cultivos em altas

doses, em alguns casos, sem realizar um monitoramento através de análise química e análise do tecido foliar nos seus talhões para o uso de critérios técnicos e uma correta nutrição das plantas ao longo dos anos, fazendo com que encontramos solos com altos teores de fósforo, e assim, reduzindo a absorção de cobre pelas plantas e conseqüentemente podendo ocasionar redução da produtividade. Em talhões com teores muito altos de fósforo disponível, seria eficiente economicamente a aplicação de cobre, via foliar, após a constatação dos altos teores de fósforo no solo.

No segundo cultivo (safra 2016/2017), não houve interação P x Cu, apenas resposta positiva na produtividade da soja. Mesmo o solo com teor muito alto de fósforo disponível, com a aplicação das doses de fósforo testadas houve aumento significativo da produtividade da soja em relação a não aplicação de fósforo.

O crescimento radicular é estimulado na presença de P (Barber, 1995), de modo geral, a distribuição de raízes segue a mesma tendência do que ocorre para os teores de P no solo, sendo fortemente influenciada pelo sistema de manejo do solo e adubação fosfatada (Holanda et al., 1998; Costa et al., 2010). Talvez, devido o menor índice pluviométrico nos estágios iniciais da cultura da soja em relação o primeiro cultivo, o uso de doses de fósforo aumentou a produtividade da cultura da soja. Segundo Santos & Tomm (2003) a cultura da aveia semeada no inverno, pode ter realizado a absorção dos nutrientes, e devido à baixa decomposição inicial dos resíduos vegetais após a sua dessecação, nos estágios iniciais da cultura da soja, uma dose de fósforo de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ apresentou resultados positivos na produtividade da soja. Segundo Trigo et al. (1997), os autores encontraram resultados semelhantes ao estudo, mostrando que doses iniciais de P proporcionam maior crescimento inicial das plântulas e desenvolvimento maior e mais rápido do sistema radicular, resultando no aumento da absorção de nutrientes e, conseqüentemente, na capacidade produtiva das plantas. Mesmo relato citado por Lopes et al. (2001) que com a aplicação de fertilizantes fosfatados inicial na cultura da soja houve vantagens no desenvolvimento da plântula de soja, associado à utilização do P pela plântula, pois o sistema radicular ainda está reduzido no início de desenvolvimento, aumentando assim a possibilidade de formar um estande mais uniforme de plantas.

Para o fator cobre, no segundo cultivo à aplicação de 10 g ha⁻¹ de Cu promoveu a maior produtividade, seguido da aplicação de 20 g ha⁻¹. Estes valores diferiram estatisticamente do tratamento que não recebeu aplicação de cobre.

Em trabalho realizado por Galvão (1991), ocorreu efeito do cobre no rendimento de grãos de soja, onde obteve aumento na produtividade de 0,58, 0,41, e 0,47 T ha⁻¹ de grãos respectivamente, no segundo, terceiro e quarto cultivo, após a aplicação a lanço de 2 kg ha⁻¹ de sulfato de cobre. Galvão (1999) também comparando o efeito de três métodos de aplicação de Cu: no solo, em pulverização foliar e na semente, para determinar a produção de soja em três anos de cultivo, mostrou que a aplicação de 0,6 kg ha⁻¹ de sulfato de cobre via foliar apresentou incremento de produtividade da soja.

Devido aos teores muito altos de fósforo disponível neste estudo, os mesmos possivelmente ocasionaram distúrbios no solo fazendo com que aumentasse a adsorção de cobre, pela interação P-Cu, diminuindo a absorção de Cu pelas plantas. Este estudo está em concordância com Canizella et al. (2015), onde doses de Cu acarretaram em efeito significativo na produção de grãos de trigo e soja. No trigo, as maiores produções foram obtidas com aplicação de 4,21 e 4,49 kg ha⁻¹ de sulfato de cobre nos anos agrícolas de 2013 e 2014, respectivamente, enquanto na soja, os valores foram de 3,97 e 4,23 kg ha⁻¹ de sulfato de cobre nas safras 2013/2014 e 2014/2015. As doses estimadas de cobre, tanto para cultura do trigo e soja nos dois anos agrícola estão acima das doses indicadas como adequadas por Galvão (1999) e TPS (2013). Segundo os autores, esses resultados ocorreram devido à aplicação do sulfato de cobre ser realizada sobre o solo, antes da semeadura das culturas, devido aos teores altos de fósforo e o uso de material genético mais exigente.

Apesar de ser exigido em pequenas quantidades pelas plantas, o cobre é essencial para completar seu ciclo, sendo que, quando fornecidas em quantidades inferiores às exigências, pode ocorrer uma diminuição na produtividade (Luchese et al., 2004). Mesmo os solos apresentando teores adequado de Cu, sua dinâmica e disponibilidade as culturas são afetada pelo pH, a umidade, teor de matéria orgânica, a fração mineral e biológica do solo, teores de fósforo, além da planta (Bertoni et al., 1999). Mostrando que em solos com teores muito alto de fósforo, é eficiente a aplicação de cobre, via foliar, na cultura da soja para o aumento da produtividade. Assim, a resposta da soja a adubação com cobre, é dependente da sua disponibilidade no solo e fatores climáticos.

5.5.2 Componentes de rendimento

No segundo cultivo, safra 2016/2017 foram determinados os componentes de rendimento da cultura da soja. Número de legumes por planta, número de grãos por planta e a massa de 1000 grãos apresentaram efeito isolado para as doses de P e Cu. Para o componente de rendimento número de grãos por legume não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos.

O número de legumes por planta foi sensível às doses de fósforo aplicado na cultura da soja, esses resultados estão em concordância dos obtidos por Soares (2013) que também ocorreu incremento no número de legumes por planta na cultura da soja à medida que se aumentou a dose de fósforo no solo. Zucareli et al. (2006) na cultura do feijão, cv IAC Carioca, constatou que na dose de 150 kg ha⁻¹ de fósforo, também na forma de superfosfato triplo, ocorreu incremento do número de legumes por planta, assim como para o número de sementes por planta.

Vários fatores participam e interagem para determinar o rendimento da cultura da soja e seus componentes de produção, dentre os quais com destaque, os climáticos e os de manejo da cultura (Marchezan, 1982). No caso da soja, mesmo nas melhores condições de cultivo ocorre aborto de flores e de legumes, porém com a aplicação de doses de fósforo, maior pode ser a produção de flores e legumes, e conseqüentemente menor aborto dessas estruturas reprodutivas. Segundo Rosolém & Bastos (1997) o P é importante para o pegamento e desenvolvimento da parte reprodutiva da planta. Em relação ao número de grãos por planta, também foi obtido efeito significativo para as doses de fósforo. Peske et al. (2009) obtiveram resultado positivo nas maiores doses de fósforo aplicada no solo em relação a esse componente de rendimento, tanto em solos com alta disponibilidade de fósforo quanto em solos com baixa disponibilidade do nutriente, de acordo com análise de solo.

O número de legumes e grãos por planta foi sensível às doses de cobre aplicado na cultura da soja. Em estudo semelhante realizado por Garcia et al. (2009) também verificaram que a aplicação foliar com cobre proporcionaram melhor desenvolvimento da cultura e maior número de legumes por planta e grãos por planta. Em solos com teores muito altos de fósforo disponível, o P aumenta a adsorção de Cu no solo, assim reduzindo sua disponibilidade as plantas. Quando há deficiência de cobre, as atividades de algumas enzimas ficam drasticamente

reduzidas. O decréscimo do transporte fotossintético de elétrons, como consequência, especialmente dos menores teores da plastocianina, uma proteína contendo Cu, diminuem a taxa de fixação de CO₂, de tal modo que o teor de amido e de carboidratos solúveis (especialmente sacarose) é reduzido. Assim, afetando a produção de legumes por planta e grãos por plantas na cultura, mais que o desenvolvimento vegetativo (Cakmak, 2000; Kerbauy, 2004).

Outro componente de rendimento avaliado e que ocorreu diferença significativa foi à massa de 1000 grãos. Corrêa et al. (2004), testando diferentes doses de P, obtiveram resultado positivo quanto à massa de 1000 sementes, à medida que se aumentou a concentração do nutriente no solo, com melhor resultado na dose aplicada de 150 kg ha⁻¹ de P, vindo ao encontro do observado neste estudo. Também para as doses de cobre, a massa de 1000 grãos ocorreu diferença significativa, em relação ao tratamento sem aplicação de cobre. A massa de 1000 grãos também foi influenciada quando Giroldo (2000) aplicou 2,7 kg ha⁻¹ de sulfato de cobre e isso se refletiu no incremento da produtividade de grãos, provavelmente devido à baixa disponibilidade na solução do solo deste nutriente. Vieira et al. (1987) também constataram efeito positivo da aplicação de cobre sobre a massa de 1000 sementes, observaram sementes mais leves nos tratamentos onde não houve a aplicação de cobre.

O cobre é essencial para a atividade de enzimas, fazendo com que não ocorra redução da lignificação e de substâncias melanóticas. A formação da lignina significa uma barreira mecânica contra a entrada de organismos, assim como a produção de substâncias melanóticas também aumenta a resistência, pois alguns desses compostos são ativos como fitoalexinas, as quais inibem a germinação de esporos e o crescimento fúngico (Reuter et al., 1981; Cakmak, 2000). Possivelmente, as aplicações de cobre ajudaram à planta na resistência as doenças, pois foi observado nas parcelas com aplicação de cobre pequeno retardo na maturação fisiológica da cultura, obtendo assim, maior massa de 1000 grãos na cultura da soja.

As respostas a micronutrientes têm ocorrido com maior frequência nas condições de cerrado, sendo que, no sul do Brasil, existem poucos experimentos realizados, havendo, assim, a necessidade de mais estudos que auxiliem técnicos e produtores na sua tomada de decisão sobre o uso de micronutrientes (Ceretta et al., 2005).

Para a variável número de grãos por legume não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos. Esses resultados estão em concordância dos obtidos por Souza (2008) que não observou diferença significativa entre as doses de cobre e o componente de rendimento de grãos por legume. E, em estudos realizado por Pelá et al. (2009), que também não observaram diferença significativa entre os tratamentos de fósforo quanto ao número de grãos por legume na cultura do feijão. Isso indica que essa característica é determinada geneticamente e, portanto, sofre pouca interferência do meio.

5.5.3 Nodulação da soja

O número de nódulos por planta e massa de nódulos secos, avaliados na safra 2016/2017, não apresentaram efeito significativo com a análise estatística realizada para as doses de Cu e P.

Esses resultados vêm em concordância ao trabalho realizado por Seliga (1998) em casa de vegetação, que mostrou que a aplicação de Cu em soja e feijão-fava para as variáveis, número de nódulos e massa de nódulos ocorreu diferença significativa apenas para o feijão-fava. O autor atribuiu esse resultado à maior concentração de leghemoglobina nos nódulos das plantas de feijão-fava, em comparação à soja. Isso demonstra que a necessidade de Cu para a fixação biológica de N na cultura da soja é menor. Resultados também confirmam os encontrados por Sánchez-Pardo et al. (2010), que tanto o número de nódulos quanto a massa de nódulos, não sofreu diferença significativa com as doses de cobre aplicada nas plantas de soja. Resultados em concordância com os encontrados por Soares (2009) que independente da concentração de P, a mesma não proporcionou aumento da nodulação das plantas de soja em condições de solo com níveis adequado de P.

5.5.4 Cu e P nas folhas das plantas de soja

No primeiro cultivo, safra 2015/2016, na variável fósforo, não houve efeito significativo. Já para a variável cobre, ocorreu interação para as doses de P aplicadas, sendo que foram observadas maiores concentrações de Cu no tratamento 0 kg ha^{-1} de P_2O_5 .

Na literatura existem informações de que os teores de P no tecido foliar não foram influenciados com as doses aplicadas, já para o Cu, houve alteração significativa de seus teores à medida que as doses de P variaram (Girollo, 2000; Salum et al., 2008). Quanto maior as doses de P, menor o teor de Cu no tecido foliar da cultura da soja. Segundo Mengel & Kirkby (1987), afirmaram que o P inibe a absorção do Cu pelas plantas. A adição de doses de P nos solos pode diluir a concentração de Cu nos tecidos, mas também, pode diminuir o transporte de Cu da raiz para a parte aérea (Loneragan et al., 1982; Araujo & Machado, 2006; Soares et al., 2006). Devido ao maior volume de precipitação no primeiro cultivo, pode ter ocorrido diluição da concentração de Cu nos tecidos, pela grande massa foliar das plantas. Deon (2007) também observou efeito significativo de doses de fósforo em solução nutritiva sobre a concentração foliar de cobre na soja, com a concentração de fosfato na solução nutritiva de 7 mmolc L^{-1} , as plantas apresentaram $3,97 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cu nas folhas diagnósticas. Wallace et al. (1978), em seu trabalho o cobre nas folhas representou $6,6 \text{ mg kg}^{-1}$ quando o fósforo na solução foi igual a $0,02 \text{ mmolc L}^{-1}$ e $4,2 \text{ mg kg}^{-1}$ com 4 mmolc L^{-1} de P. 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, 1968; Spratt & Smid, 1978; Timmer & Leyden, 1980).

No segundo cultivo, safra 2016/2017, as variáveis foliar do teor de P e Cu não apresentaram efeitos significativos com a análise estatística realizada. Possivelmente pela redução da precipitação no estágio vegetativo da cultura, em relação ao primeiro cultivo.

5.5.5 Análise econômica

Na discussão sobre o uso de adubação fosfatada em solos com teores muito altos de P e do micronutriente Cu na soja, não basta apenas à avaliação da produtividade física, devendo ser agregada a análise econômica, porque estas variáveis são fundamentais à tomada de decisão de produtores e técnicos.

A aplicação das doses de fósforo apesar de terem proporcionado um aumento da produtividade de grãos da cultura, não foi viável economicamente, pois nas doses de 69 e 138 kg ha^{-1} de P_2O_5 , respectivamente, houve um retorno líquido negativo de

R\$ 130,74 e R\$ 348,27 reais por hectare, em relação à testemunha. Diferentemente para o cobre, que houve resposta positiva econômica à sua aplicação em solos com teores muito altos de fósforo, pois promoveram retorno líquido nas duas doses testadas de R\$ 143,20 e R\$ 106,60 reais por hectare, em relação à testemunha. O lucro médio foi de 7%, tomando-se por base o custo de produção médio de 45 sacas ha^{-1} .

Assim, considerando-se apenas o aspecto econômico, a adubação fosfatada resultou em decréscimo da receita líquida da soja. O contrário ocorreu para as aplicações de Cu, a qual foi obtido aumento de produtividade e maior receita líquida quando comparado com a testemunha onde não foi realizada a aplicação. O aumento da produtividade da soja, obtido com as aplicações de fósforo, não foi suficiente para aumentar a receita líquida da cultura. Com isso, esses resultados indicam a necessidade de se reavaliar o manejo da adubação fosfatada, em solos com teores muito altos de fósforo, para conciliar o uso mais eficiente de fertilizantes com maior lucratividade para o produtor.

5.6 Conclusões

Em solos com teores de fósforo previamente muito alto e que receberam aplicações de altas doses de fósforo houve resposta à adubação foliar com cobre na produção de grãos de soja, a qual se mostrou viável economicamente. Por outro lado, os incrementos proporcionados pela aplicação de fósforo nos solos com teores muito altos não foram viáveis economicamente.

A aplicação de cobre foliar influenciou positivamente o número de legumes por planta, grãos por planta, a massa de 1000 grãos e produtividade da cultura da soja.

A aplicação de fósforo interferiu significativamente no número de legumes por planta, grãos por planta, massa de 1000 grãos e produtividade da cultura, mesmo em solos com teores muito altos de fósforo.

Os tratamentos de cobre e fósforo não influenciaram o número de grãos por legume, número de nódulos por planta e a massa de nódulos.

5.7 Referências

- ABREU, C. A.; FERREIRA, M. E.; BORKERT, J. C. Disponibilidade e avaliação de elementos catiônicos: zinco e cobre. In: FERREIRA, M. E. et al. **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTATOS, 2001. p.125-150.
- ARANTES, N. E.; SOUZA, P. I. D. M. D. **Cultura da soja no Cerrado**. Piracicaba, SP: Potafos, 1993.
- ARAUJO, A. P.; MACHADO, C. T. T. Fósforo. In: FERNADES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**, Viçosa: SBCS, 2006. p.253-280.
- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2.ed. New York: John Wiley e Sons, Inc., p.414, 1995.
- BERTONI, J. C.; HOLANDA, F. S. R.; CARVALHO, J. G.; PAULA, M.B.; ASSIS, M. P. Efeito do cobre na nutrição do arroz irrigado por inundação, teores e acúmulo de nutrientes. **Ciência e Agrotecnologia**, v.23, p.547-599, 1999.
- 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.
- BINGHAN, F. T. Relation between phosphorus and micronutrients in plants. **Soil Science Society of America Proceedings**, Ann Arbor, v. 27, p.389-391, 1963.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: DNDV/SNAD/CLAN, 1992. 365p.

BRUNETTO, G.; LORENSINI, F.; CERETTA, C. A.; GATIBONI, L. C.; TRENTIN, G.; GIROTTTO, E.; MIOTTO, A.; LOURENSI, C. R.; MELO, G. W. B. Soil phosphorus fractions in a Sandy Typic Hapludaft as affected by phosphorus fertilization and grapevine cultivation period. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 44, p.1937-1950, 2013.

CAKMAK, I. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. **New Phytologist**, Cambridge, v.146, p.185-205, 2000.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C. Reações dos micronutrientes e elementos tóxicos no solo. In: FERREIRA, M. E. et al. **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTATOS, p.89-117, 2001.

CANIZELLA, B. T.; MOREIRA, A.; MORAES, L. A. C. Disponibilidade de cobre na rotação soja-trigo em sistema plantio direto. **XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, Natal, 2015.

CERETTA, C. A.; PAVINATO, A.; PAVINATO, P. S.; MOREIRA, I. C. L.; GIROTTTO, E.; TRENTIN, E. F. Micronutrientes na soja: produtividade e análise econômica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, p.576-581, 2005.

CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; MENDES, J. S. Adsorção de fósforo em materiais de Latossolo e Argissolo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.20, p.104-111, 2007.

CIAMPITTI, I. A.; PICONE, L. I.; RUBIO, G.; GARCIA, F. O. Pathways of phosphorus fraction dynamics in field crop rotations of the pampas of Argentina. **Soil Science Society of America Journal**, v.75, p.918-926, 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO-CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, 2017. 170p. Disponível em: http://www.conab.gov.br/17_07_12_11_17_01_boletim_graos_julho_2017.pdf. Acesso em: 07 agost. 2017.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre, RS: SBCS - Núcleo Regional Sul/UFRGS, 2004.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11.ed. Pallotti, RS: SBCS - Núcleo Regional Sul, 2016.

CORRÊA, J. C.; MAUAD, M.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus in soil and soybean growth as affected by phosphate fertilization and cover crop residues. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.1231-1237, 2004.

COSTA, S. E. V. G. A.; SOUZA, E. D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J. P. C.; VIEIRA, F. C. B.; MARTINS, A. P.; FERREIRA, E. V. O. Patterns in phosphorus and corn root distribution and yield in long-term tillage systems with fertilizer application. **Soil and Tillage Research**, v.109, p.41-49, 2010.

CUNHA, F. J.; CASARIN, V.; PROCHNOW, L. I. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira no período de 1988 a 2010. **Informações agronômicas**, Piracicaba, p.1-7, 2011.

DEON, M. D. **Crescimento e nutrição mineral da soja submetida a excesso de P, S, K, Ca e Mg em solução nutritiva**. 2007. 72p. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de São Paulo, Piracicaba.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, DF, 2013. 353p.

FAO (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A AGRICULTURA E A ALIMENTAÇÃO). **Cenário da demanda por alimentos**. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/fao-se-o-atual-ritmo-de-consumo-continuar-em-2050-mundo-precisara-de-60-mais-alimentos-e-40-mais-agua>. Acesso em: 05 nov. 2017.

FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. da (Ed.). **Micronutrientes na Agricultura**. Piracicaba, SP: POTAFÓS / CNPq. 1991. 734 p.

FERREIRA, D. F., Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, p.1039-1042, 2011.

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52p. (Embrapa Soja. Documentos, 327). Disponível em: http://www.cnpso.embrapa.br/download/Doc_327-VE.pdf. Acesso em: 15 dez. 2017.

GALRÃO, E. Z. Micronutrientes e cobalto no rendimento da soja em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.117-120, 1991.

GALRÃO, E. Z. Métodos de avaliação de cobre e avaliação da disponibilidade para a soja num Latossolo Vermelho-Amarelo franco-argiloso-arenoso fase cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.265-272, 1999.

GARCIA, G. G.; SILVA, T. R. B.; SECCO, D. Épocas de aplicação e doses de fertilizante a base de cobre e zinco no rendimento de grãos de soja. **Cultivando o Saber**, Cascavel-PR, v.2, p.18-25, 2009.

GIROLDO, A. F. **Efeito da aplicação de B, Cu e Mn em soja (*Glycine max* (L.) Merrill) cultivada sobre um latossolo de Ponta Grossa, Paraná**. 2000. 99p. Tese (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

GIROTTI, E. CERETTA, C. A.; SANTOS, D. R.; BRUNETTO, G.; ANDRADE, J. G.; ZALAMENA, J. Formas de perdas de cobre e fósforo em água de escoamento superficial e percolação em solo sob aplicações sucessivas de dejetos líquidos de suínos. **Ciência Rural**, v.40, p.1948-1954, 2010.

HANSEL, F. D.; OLIVIERA, M. L. Importância dos micronutrientes na cultura da soja no Brasil. **International plant nutrition institute INPI**. p.2-9, 2016.

HOLANDA, F. S. R.; MENGEL, D. B.; PAULA, M. B.; CARVAHO, J. G.; BERTONI, J. C. Influence of crop rotations and tillage systems on phosphorus and potassium stratification and root distribution in the soil profile. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.29, p.2383-2394, 1998.

IBRAHIM, S.; FARYAL, S. Augmentation of *Trigonella foenum-graecum* L. (methi) Growth under Salinity Stress and Allelochemical stress Through Mn+B+Zn Mixture Foliar Spray. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v.3, p.39-44, 2014.

INOCÊNCIO, M. F.; RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; VELOSO, M. P.; FERRAZ; F. M.; HICKMANN, C. Resposta da soja à adubação com zinco em solo com teores acima do nível crítico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.1550-1554, 2012.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. São Paulo: Guanabara Koogan, 2004. p.451.

KIRKBY, E. A. E ROMHELD, V. **Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade**. International Plant Nutrition Institute – INPI, 2007. 1-24 p. Informações Agronômica. Disponível em: [http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/8A79657EA91F52F483257AA10060FACB/\\$FILE/Encarte-118.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/8A79657EA91F52F483257AA10060FACB/$FILE/Encarte-118.pdf). Acesso em: 10 nov. 2017.

LINDSAY, W. L. Inorganic equilibria affecting micronutrients in soil. In: MORTVEDT, J. J. et al. **Micronutrients in Agriculture**. Book Series 2nd edition. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America,, 1991. p.89-112.

LIU, J.; DUAN, C. Q.; ZHU, Y. N. Effect of chemical fertilizers on the fractionation of Cu, Cr and Ni in contaminated soil. **Environmental Geology**. n. 52, p.1601-1606, 2007.

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.; 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**, v.46, p.345-352, 1982.

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 Academic Publishers, p.119-134, 1993.

LOPES, A. S. **Boletim Técnico de Pesquisa de Soja**. Rondonópolis, MT: Fundação MT. p.144, 2001.

LUCHESE, A. V.; GONÇALVES JÚNIOR, A. C.; LUCHESE, E. B.; BRACCINI, M. C. L. Emergência e absorção de cobre por plantas de milho (*Zea mays*) em resposta ao tratamento de sementes com cobre. **Ciência Rural**, v.34, p.1949-1952, 2004.

MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**, São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MARCHEZAN, E. **Produção e fixação de flores e legumes, por nó do caule e dos ramos em três cultivares de soja**. 1982. 105p. Tese (Mestrado) - Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. Ed. 3. Austrália: Elsevier, p.651-656, 2012.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of Plant Nutrition**. 4. ed. Worblaufen-Bern, Switzerland: International Potash Institute, 1987. 687p.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 41p.

NOVAIS, F. R.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B. NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-550.

NUNES, R. S.; SOUSA, D. M. G.; GOEDERT, W. J.; VIVALDI, L. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.877-888, 2011.

PELÁ, A. RODRIGUES, M. S.; SANTANA, J. S.; TEIXEIRA, I. R. Fontes de fósforo para adubação foliar na cultura do feijoeiro. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.10, p.313-318, 2009.

PÉREZ-NOVO, C.; BERMÚDEZ-COUSO, E.; LÓPEZ-PERIAGO, E.; FERNÁNDEZ-CALVIÑO, D.; ARUAS-ESTÉVES, M.. The effect of phosphate on the sorption of copper by acid soils. **Geoderma**, v.150, p.166–170, 2009.

PÉREZ-NOVO, C.; BERMÚDEZ-COUSO, E.; LÓPEZ-PERIAGO, E.; FERNÁNDEZ-CALVIÑO, D.; ARUAS-ESTÉVES, M. Zinc adsorption in acid soils: Influence of phosphate. **Geoderma**, v.162, p.358–364, 2011a.

PÉREZ-NOVO, C.; FERNÁNDEZ-CALVIÑO, D.; BERMÚDEZ-COUSO, E.; LÓPEZ-PERIAGO, E.; ARUAS-ESTÉVES, M. Phosphorus effect on Zn adsorption desorption kinetics in acid soils. **Chemospher**, v.83, p.1028–1034, 2011b.

PESKE F. B.; BAUDET, L.; PESKE, S. T. Produtividade de plantas de soja provenientes de sementes tratadas com fósforo. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, p.95-101, 2009.

PIAIA, F. L.; REZENDE, P. M.; FURTINI NETO, A. E.; FERNANDES, L. A.; CORRÊA, J. B. Eficiência da adubação fosfatada com diferentes fontes e saturações por bases na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Ciência e Agrotecnologia**, v.26, p.488-499, 2002.

PRADO, R. M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: Ed. Unesp, 2008. p.407

RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres; Potafos, 1991. 343p.

RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. **Campinas: Instituto Agrônomo Bragantia**, 2001. 285p.

REUTER, D. J.; ROBSON, A. D.; LONERAGAN, J. F.; TRANTHIM-FRYER, D. J. Copper nutrition of subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L. cv Seaton Park) effects of copper supply on the distribution of copper and the diagnosis of copper deficiency by plant analysis. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v.32, p.267-282, 1981.

RÖMHELD, V.; MARSCHNER, H. Functions of micronutrients in plants. In: MORTVEDT, J. J. et al. (Eds.). **Micronutrients in Agriculture**. Book Series, 2nd edition. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, 1991. p.297-328.

ROSOLEM, C. A.; BASTOS, G. B. Deficiências minerais no cultivar de algodão IAC 22, **Bragantia**, v.56, p.377-387, 1997.

SALUM, J. D.; ZUCARELI, C.; GAZOLA, E.; NAKAGAWA, J. Características químicas e fisiológicas de sementes de feijão em função do teor de fósforo na semente e doses de fósforo no solo. **Revista Brasileira de Sementes**, v.30, p.140-149, 2008.

SÁNCHEZ-PARDO, B.; CARPENA, R. O.; ZORNOZA, P. Localisation of copper and iron in nodules of copper-stressed soybean plants determined by energy-dispersive X-ray microanalysis. **Journal of Plant Physiology**, p.249-251, 2010.

SANTOS, H. P.; TOMM, G. O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função de sistemas de cultivo e de manejo de solo. **Ciência Rural**, v.33, p.477-486, 2003.

SARIOGLU, M.; ATAY, Ü. A.; CEBECI, Y. Removal of copper from aqueous solutions by phosphate rock. **Desalination**, v.181, p.303-311, 2005.

SCHACHTMAN D. P; REID R. J.; AYLING S. M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. **Plant Physiology**, v.116, p.447–453, 1998.

SCHMITT, D. E.; GATIBONI, L. C.; GIROTTO, E.; LORENSINI, F.; MELO, G. W. B.; BRUNETTO, G. Phosphorus fractions in the vineyard soil of the Serra Gaúcha of Rio Grande do Sul, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.134-140, 2014.

SELIGA, H. Nitrogen fixation in several grain legume species with contrasting sensitivities to copper nutrition. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.20, p.263-267, 1998.

SFREDO, G. J.; BORKERT, C. M.; LANTMANN, A. F.; CASTRO, C. Resposta da soja à aplicação de Mo em oito solos do Brasil. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, p.54-61, 1996.

SFREDO, G. J. **Soja no Brasil: calagem, adubação e nutrição mineral**. Londrina, 2008. 148p. (Embrapa Soja. Documentos, 305). Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/download/Doc305.pdf>. Acesso em: 02 out. 2017.

SOARES, C. R. F. S.; SIQUEIRA, J. O.; CARVALHO, J. G.; GUILHERME, L. R. G. Micorriza arbuscular e nutrição fosfática na toxidez de zinco para trema (*Trema micranta* (L.) Blum.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, 2006.

SOARES, M. M. **Efeito do recobrimento de sementes com fósforo na qualidade das sementes, nodulação e crescimento das plantas de soja**. 2009. 71p. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

SOARES, M. M. **Nodulação, nutrição, componentes de rendimento e qualidade de sementes de soja em função do recobrimento de sementes e parcelamento da adubação fosfatada.** 2013. 110p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G., LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação.** 2.ed. Planaltina: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.147-168.

SOUZA, S. A. **Efeitos da aplicação de nutrientes na produtividade e qualidade de sementes de soja.** 2008. 65p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A.; GOEDERT, W. J.; LOBATO, E.; NUNES, R. S. Fósforo. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Eds.) **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: volume 2, nutrientes.** Piracicaba: INPI - Brasil, 2010. p.67-132.

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, 1978.

SULTENFUSS, J. H.; DOYLE, W.J.; Better Crops with plant food. **Phosphorus. Potash & Phosphate Institute.** v.83, p.1- 27 ,1999.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal.** 4ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848p.

TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A. **Soja, nutrição, correção do solo e adubação.** Campinas: Fundação Cargil, p.60, 1992. (Boletim Técnico, 7)

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solos, plantas e outros materiais.** 2.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

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

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

TPS - Tecnologia de Produção de Soja - Região Central do Brasil 2014.

Londrina: Embrapa Soja. 2013. 266p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/95489/1/SP-16-online.pdf>.

Acesso em: 12 out. 2017.

TRIGO, L. F. N.; PESKE S. T.; GASTAL, M. F.; VAHL, L. C.; TRIGO, M. F. O. Efeito o conteúdo de fósforo na semente de soja sobre o rendimento da planta resultante. **Revista Brasileira de Sementes**, v.19, p.111-115, 1997.

VIEIRA, R. F.; FONTES, R. A.; CARVALHO, J. R. P. Desempenho de sementes de feijão colhidas de plantas não adubadas, adubadas com macronutrientes e com macro + micronutrientes. **Revista Ceres**, v.34, p.162-178, 1987.

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

YRUELA, I. Copper in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, p.145-156, 2005.

ZUCARELI, C.; JUNIOR, E. U. R.; BARREIRO, A. P.; NAKAGAWA, J.; CAVARIANI, C. Adubação fosfatada, componentes de produção, produtividade e qualidade fisiológica em sementes de feijão. **Revista Brasileira de Sementes**, v.28, p.9-15, 2006.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEEZ, M. O.; ADESANWO, O. O.; ADEPETU, J. A. Effect of copper (Cu) application on soil availability nutrients and uptake. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 5, p. 359–364, 2015.
- BARROW, N. J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. **Journal Soil Science**, v. 34, p.730-750, 1983.
- BATAGLIA, O. C.; MASCARENHAS, H. A. A. **Absorção de nutrientes pela soja**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1977. 36 p. (Boletim Técnico, n. 41).
- BATAGLIA, O. C. **Micronutrientes: Disponibilidade e Interações**. In: BORKERT, C. M.; LANTMANN, A. F. (Eds.). Enxofre e Micronutrientes na Agricultura Brasileira. Londrina, PR, EMBRAPA-CNPq/IAPAR/SBCS, p. 121-132, 1988.
- BECK, M. A.; SANCHEZ, P. A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n.5, p. 1424-1431, 1994.
- BOITT, G., 2014. **Mineralogia e distribuição das formas de fósforo em latossolos com diferentes graus de intemperismo**. Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Lages, 2014.
- BORKERT, C. M.; LANTMANN, A. F. **Enxofre e Micronutrientes na Agricultura Brasileira**, Londrina, PR, EMBRAPA-CNPq/IAPAR/SBCS, p. 306-308, 1988.
- BUZETTI, S.; NAKAGAWA, J.; MURAOKA, T. **Avaliação das necessidades de enxofre e de micronutrientes na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill), em solo sob vegetação de cerrado – II**. Científica, 17:15-24, 1989.
- CAKMAK, I. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. **New Phytologist**, Cambridge, v. 146, p. 185-205, 2000.
- CARVALHO, J. L. et al. **A soja e os novos desafios mundiais**. In: Soja e CIA. CAMARA, G. M. de S, Piracicaba, p. 334, 2009.
- CIAMPITTI, I. A. et al. Pathways of phosphorous fraction dynamics in field crop rotations of the pampas of Argentina. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, n. 3, p. 918–926, 2011.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11.ed. Pallotti, RS: SBCS - Núcleo Regional Sul, 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO-CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, 2017. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_07_12_11_17_01_boletim_graos_julho_2017.pdf. Acesso em: 07 ago. de 2017.

COSTA, S. E. V. G. A. et al. Phosphorus and root distribution and corn growth related to longterm tillage systems and fertilizer placement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p.1237-1247, 2009.

CROSS, A. F.; SCHLESINGER, W. H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, v. 64, p. 197-214, 1995.

DOMINGUES, L. S., 2010. **Influência de cultivares e densidades de plantas sobre a eficácia de proteção química no patossistema soja-*Phakopsora pachrhizi***. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão. **Informações técnicas para o cultivo de feijão**. Brasília: Embrapa-SPI, 1996. 32p. (Encarte Técnico).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. Embrapa Soja. **Tecnologias de Produção de Soja Região Central do Brasil 2004**. Sistema de Produção Nº1. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/manejoi.htm>>. Acesso em: 05 jan. 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **XXXIV Reunião de Pesquisa de Soja**. Londrina: Embrapa Soja 2014. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1028065/1/doc3621.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Desafios da fertilidade do solo e nutrição de plantas para cultivo de grãos no Cerrado**. Embrapa Cerrados 2017. Disponível em: <<https://www.conafe2017.com.br/downloads/palestras/Rafael%20Nunes.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

FANCELLI, A. L. **Influência da nutrição de plantas na ocorrência de doenças e pragas**. In: FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. (Ed.), Feijão irrigado – tecnologia de produtividade, Piracicaba: ESALQ/USP, p. 1-29, 2003.

FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 432, 2006.

FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. da. **Micronutrientes na Agricultura**. Piracicaba, SP: POTAFÓS/CNPq, p. 734, 1991.

- FIXEN, P. E.; GROVE, J. H. **Testing soils for phosphorus**. In: WESTERMAN, R.L. (Ed.) *Soil Testing and Plant Analysis*. Madison: Soil Science Society of America, p. 141-180, 1990.
- GALRÃO, E. Z. Micronutrientes e cobalto no rendimento da soja em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p. 117-120, 1991.
- GALRÃO, E. Z. Métodos de aplicação de Cu e avaliação da disponibilidade para a soja num Latossolo Vermelho-Amarelo Franco-argilo-arenoso fase Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 23, p. 265-272, 1999.
- GAMA-RODRIGUES, A. C. et al. An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. **Biogeochemistry**, v. 118, n. 1, p. 453–469, 2014.
- GATIBONI, L. C. et al. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.4, p. 691-699, 2007.
- GATIBONI, L. C. et al. Soil phosphorus thresholds in evaluating risk of environmental transfer to surface waters in Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1225–1234, 2015.
- GIROLDO, A. F., 2000. **Efeito da aplicação de B, Cu e Mn em soja cultivada sobre um latossolo de Ponta Grossa, Paraná**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Curitiba, 2000.
- GUO, F.; YOST, R. S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Science**, v. 163, n. 10, p. 822-833, 1998.
- GUO, F. et al. Changes in phosphorus fractions under intensive plant growth. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 5, p. 1681-1689, 2000.
- HÄNSCH, R.; MENDEL, R. R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). **Current Opinion in Plant Biology**, United Kingdom, v. 12, p. 259-266, 2009.
- HARTMAN, G. L.; WEST, E. D.; HERMAN, T. K. Crops that feed the World 2. Soybean- worldwide production, use, and constraints caused by pathogens and pests. **Food Security**, Beltsville, v. 3, p. 5-17, 2011.
- INOCÊNCIO, M. F. et al. Resposta da soja à adubação com zinco em solo com teores acima do nível crítico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 10, p. 1550-1554, 2012.
- INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE. **Remoção de nutrientes**, 2017. Disponível em: <<https://www.ipni.net/ipniweb/app/calc.nsf/0/AC49F13A561C8CF7852581D700007108>>. Acesso em: 10 nov. de 2017>.

- KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. São Paulo: Guanabara Koogan, p. 451, 2004.
- KIRKBY, E. A.; ROMHELD, V. Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade. **International Plant Nutrition Institute – INPI**, 2007. 1-24 p. (Informações Agronômicas - Encarte Técnico).
- LOPES, A. S.; CARVALHO, J. G. de. **Técnicas de levantamento e diagnose da fertilidade do solo**. In: OLIVEIRA, A. J. de; GARRIDO, W. E.; ARAÚJO, J. D. de; LOURENÇO, S. Métodos de Pesquisa em fertilidade do solo. Brasília: EMBRAPA-SEA, p. 329, 1991.
- LUCHESE, A. V. et al. Emergência e absorção de cobre por plantas de milho (*Zea mays*) em resposta ao tratamento de sementes com cobre, **Revista Ciência Rural**, n. 34 p. 1949-1952, 2004.
- MAKARIM, A. K.; COX, F. R. Evaluation of the need for copper with several soil extractants. **Agronomy Journal**, n. 75 p. 493-496, 1983.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafós, p. 201, 1989.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas - Princípios e Aplicações**. 2 ed. Piracicaba, SP: Potafós, p. 319, 1997.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**, São Paulo: Editora Agronômica Ceres, p. 638, 2006.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 ed. London: Academic Press, p. 889, 1995.
- MARTINAZZO, R. et al. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto afetado pela adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 563-568, 2007.
- MASCARENHAS, H. A. A. et al. Adubação da soja. Efeitos do enxofre e de vários micronutrientes (Zn, Cu, Mn, Fe e Mo), em solo Latossolo Roxo com vegetação de cerrado. **Bragantia**, v. 26, 371-379, 1967.
- MELO, G. W. B. et al. Calagem, adubação e contaminação em solos cultivados com videiras. **Embrapa Uva e Vinho**, Bento Gonçalves, p. 71-90, 2016.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of Plant Nutrition**. 4. ed. Worblaufen-Bern, Switzerland: International Potash Institute, p. 687, 1987.
- MEURER, E. L.; RHEINHEIMER, D. S.; BISSANI, C. A. **Fenômenos de sorção em solos**. In: MEURER, E.J. (Ed.) Fundamentos de química do solo. 2.ed. Porto Alegre: Gênese, p. 121-179, 2004.
- PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. In: BRADY, N.C. (Ed.) **Advances in Agronomy**, New York: Academic Press, v. 30, p. 1-46, 1978.

- PAVINATO, P. S.; DAO, T.; ROSOLEM, C. A. Tillage and phosphorus management effects on enzyme-labile bioactive phosphorus availability in Cerrado Oxisols. **Geoderma**, v. 156, p. 207-215, 2010.
- PÉREZ-NOVO, C. et al. The effect of phosphate on the sorption of copper by acid soils. **Geoderma**, v. 150, n. 1-2, p. 166–170, 2009.
- PÉREZ-NOVO, C. et al. Zinc adsorption in acid soils: Influence of phosphate. **Geoderma**, v. 162, p. 358–364, 2011a.
- PÉREZ-NOVO, C. et al. Phosphorus effect on Zn adsorption desorption kinetics in acid soils. **Chemosphere**, n. 7, p. 1028–1034, 2011b.
- PESKE, F. B.; BAUDET, L.; PESKE, S. T. Produtividade de plantas de soja provenientes de sementes tratadas com fósforo. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, p. 95-101, 2009.
- RAIJ, B. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, n. 2, p. 142, 1983.
- REUTER, D. J. et al. Copper nutrition of subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L. cv Seaton Park). Effects of copper supply on the distribution of copper and the diagnosis of copper deficiency by plant analysis. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 32, p. 267-282, 1981.
- RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p. 345-354, 2000.
- RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.151-160, 2001.
- ROBERTSON, W. K.; THOMPSON, L. G.; MARTIN, F. G. Manganese and copper requirements for soybeans. **Agronomy Journal**, v. 65, p. 641-644, 1973.
- SÁ, M. E. **Importância da adubação na qualidade de semente**. In: SÁ, M. E; BUZZETTI, S. (Ed.). Importância da adubação na qualidade dos produtos agrícolas. São Paulo, p. 65-98, 1994.
- SANCHEZ, P. H.; SALINAS, J. G. Low input technology for managing Oxisols and ultisols in tropical America. **Advances in Agronomy**, Madison, n. 34, p. 279-406, 1981.
- SANTOS, O. S. **Micronutrientes na cultura da soja**. Informações Agrônômicas, n.85, 1999. 1-8 p. (Encarte Técnico).

- SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.2, p.576-586, 2008.
- SCHMITT, D. E. et al. Phosphorus fractions in Sandy soils of vineyards in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 472–481, 2013.
- SEDIYAMA, T. **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Macenas, p. 314, 2009.
- SELLES, F. et al. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian oxisol under different tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n. 1, p. 23-34, 1997.
- SFREDO, G. J.; BORKERT, C. M.; CASTRO, C. Estudo de micronutrientes na cultura da soja em um Latossolo Roxo eutroférico argiloso de Londrina, PR, **Embrapa - Centro Nacional de Pesquisa de Soja**, n. 16, p. 1-7, 1995.
- SFREDO, G. J. et al. Resposta da soja à aplicação de Mo em oito solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p.54-61, 1996.
- SFREDO, G. J. **Soja no Brasil: calagem, adubação e nutrição mineral**. Londrina, 2008. 148 p. (Embrapa Soja. Documentos, 305).
- SIMS, J. T; JOHNSON, G. V. Micronutrients soil tests. In: MORTVEDT, J. J.; COX, F. R.; SHUMN, L. M. & WELCH, R. M., (Eds). *Micronutrients in agriculture*. 2. ed. Madison, **Soil Science Society of America**, p. 427-476, 2004.
- SIQUEIRA, J. O et al. **Inter-relação Fertilidade, Biologia do Solo e Nutrição de Plantas**. Viçosa, MG: SBCS, Lavras, MG: UFLA/ DCS, p. 818, 1999.
- SOUSA, G.; VALLE, J. L. E.; MORENO, I. Efeitos dos componentes da soja e seus derivados na alimentação humana. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimento**, Campinas, v. 34, n. 2, p. 61-69, 2000.
- SOUSA, D. M. G. et al. **Fósforo**. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. (Eds.) *Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: volume 2, nutrientes*. Piracicaba: INPI - Brasil, p. 67-132, 2010.
- STEWART, J. W. B.; SHARPLEY, A. N. Controls on dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulfur. In: FOLLETT, R. F.; STEWART, J. W. B.; COLE, C. V.; POWER, J. F. (Eds.) *Soil Fertility and organic matter as critical components of production systems*. Madison: **Soil Science Society of America**, p.101-121, 1987.
- SULTENFUSS, J. H.; DOYLE, W. J.; Better Crops with plant food. **Phosphorus. Potash & Phosphate Institute**. v. 83, n.1, 1999.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2002.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

- TEIXEIRA, I. R. et al. Variação dos valores de pH e dos teores de carbono orgânico, cobre, manganês, zinco e ferro em profundidade em Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes sistemas de preparo de solo, **Bragantia**, v. 62, p. 119-126, 2003.
- TENG, Y.; TIMMER, V. R. Phosphorus-induced micronutrient disorders in hybrid poplar: I. preliminary diagnosis. **Plant and Soil**, v. 126, p. 19–29, 1990.
- TISDALE, S. L. et al. **Soil fertility and fertilizers**. 5 ed. New York: Macmillan, p. 634, 1993.
- UEHARA, G.; GILLMAN, G. P. **The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge**. Boulder: Westview Press, p. 188, 1981.
- VILAR, C. C. et al. Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1059-1068, 2010.
- VITTI, G. C.; LUZ, P. H. C. **Manejo químico do solo para alta produtividade da soja**. In: CÂMARA, G.M.S. (ed.). Tecnologia da produção. Piracicaba, p. 84-112, 1998.
- VITTI, G. C.; GRANDO JUNIOR, N. O uso de micronutrientes na maximização da produção. **Visão agrícola**, Piracicaba, v. 5, n.1, p. 24-26, 2006.
- WALKER, T. W.; SYERS, J. K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, v.15, p. 1-19, 1976.

7 ANEXOS

Anexo A – Parcelas com aplicação de Cu, via foliar, que ocorreu retardo na maturação fisiológica das plantas.



Anexo B – Parcelas sem aplicação de Cu, com maturação fisiológica normal das plantas e parcelas com aplicação de Cu, via foliar, que ocorreu retardo na maturação fisiológica das plantas.

