

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

Aplicações foliares de cobre no manejo da ferrugem-asiática da soja

Edevan Bedin

Passo Fundo

2018

Edevan Bedin

Aplicações foliares de cobre no manejo da ferrugem-asiática da soja

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Agronomia.

Orientador:
Prof. Dr. Geraldo Luiz Chavarria Lamas Junior

Coorientadora:
Profa. Dra. Andréia Caverzan

Passo Fundo

CIP – Catalogação na Publicação

B412aBedin, Edevan

Aplicações foliares de cobre no manejo da ferrugem-asiática da soja/Edevan Bedin. – 2018.
89f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Luiz Chavarria Lamas Junior.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Andréia Caverzan.
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, 2018.

1. Soja – Doenças e pragas. 2. Análise foliar. 3. Ferrugem asiática. 4. Soja – Efeito dos fungicidas. 5. Plantas – Teor de cobre. I. Lamas Junior, Geraldo Luiz Chavarria, orientador. II. Caverzan, Andréia, coorientadora. III. Título.

CDU:633.34

Catalogação: Bibliotecária Schirlei T. da Silva Vaz - CRB 10/1364

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO



A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação.

"Aplicações foliares de cobre no manejo da ferrugem asiática da soja"

Elaborada por

Edevan Bedin

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em
Agronomia – Produção e Proteção de Plantas

Aprovada em: 05/12/2018
Pela Comissão Examinadora

Dr. Geraldo Luiz Chavarria Lamas Junior
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador

Dr. Walter Boller
UPF

Dra. Andréia Caverzan
UPF

Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi
Coord. Prog. Pós-Graduação em Agronomia

Dra. Jaqueline Huzar Novakowski
UPF

Dr. Eraldo Lourenço Zanella
Diretor FAMV

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos familiares, amigos, colaboradores e a minha namorada, em forma de agradecimento ao total apoio recebido durante essa etapa da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço os meus pais, Ivanir Bedin e Nilva Concolato Bedin que me trouxeram ao mundo e depositaram suas confianças em mim.

Agradeço ao meu orientador, o professor Dr. Geraldo Chavarria, pelo profissionalismo e paciência. Sem o seu apoio nada disso se tornaria possível. Da mesma forma, agradeço a coorientadora, professora Dra. Andréia Caverzan. Sem a sua prontidão nada disso teria acontecido.

Agradeço a todos os colegas e equipe do Laboratório de Fisiologia Vegetal, por toda a colaboração, disponibilidade e dedicação com o trabalho.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade de Passo Fundo (UPF/PPGAgro).

A CAPES, pelo auxílio financeiro, sem o qual não poderia seguir esse sonho.

Aos meus colegas de mestrado Bruno Sebastiani e Osvaldo Rosso, pelo apoio, ideias e companheirismo durante todo o período de estudos.

Enfim, o meu muito obrigado, em especial a minha namorada Laís Bergamo, por me dar forças sempre que necessário, estar junto comigo e me apoiar nessa caminhada.

RESUMO

A ferrugem-asiática causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi* é um dos problemas fitossanitários mais graves enfrentados pela cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill], capaz de reduzir a produtividade em 80%, dependendo da época de infecção. Uma das alternativas para o manejo integrado da doença é a utilização da nutrição mineral juntamente com caldas fitossanitárias. Desse modo, o objetivo desse trabalho foi verificar se as aplicações foliares com cobre (Cu), juntamente com as caldas fitossanitárias, interferem na reação da soja à ferrugem-asiática pela variação nos teores de lignina dos tecidos foliares, refletindo na composição do rendimento da soja. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados com quatro repetições. Foram testadas quantidades de Cu (0, 30, 60, 90, 120 g Cu ha⁻¹) com duas fontes distintas (cuproso e carbonato) juntamente com as caldas fitossanitárias. Foram feitas avaliações para determinar o progresso da severidade da ferrugem-asiática, conteúdo de micronutrientes nas folhas e grãos, assim como, o teor de lignina presente nas folhas. Os componentes do rendimento e a produtividade também foram avaliados. A aplicação foliar com Cu retardou o progresso da doença, diminuindo a severidade da ferrugem-asiática, influenciando positivamente na produtividade de grãos, porém não alterou de forma significativa os componentes de rendimento. Os teores de Cu nas folhas de soja foram influenciados pela aplicação foliar, resultando em maiores concentrações desse micronutriente. Os teores de Cu foram aumentados nos grãos em função das aplicações realizadas. A quantidade de lignina presente nas folhas foi alterada significativamente com a aplicação de Cu associado às caldas fitossanitárias. Portanto, as fontes de Cu estudadas podem ser utilizadas como ferramenta complementar de manejo da ferrugem-asiática da soja.

Palavras-chave: 1. *Phakopsora pachyrhizi*. 2. *Glycine max* L. 3. Lignina. 4. Severidade. 5. Componentes do rendimento.

ABSTRACT

The Asian rust caused by the fungus *Phakopsora pachyrhizi* is one of the most serious diseases faced by soybean [*Glycine max* (L.) Merrill], which can reduce productivity by 80% depending on the time of the infection. An alternative for integrated diseases management is the use of mineral nutrition along with phytosanitary treatments. Thus, the objective this study was to verify whether foliar nutrition with copper (Cu), together with phytosanitary treatments interferes in the soybean reaction to Asian rust, by lignin variation in leaf tissues, reflecting soybean yield composition. The experimental design was a randomized block with four replicates. Four concentrations of Cu (0, 30, 60, 90, 120 g Cu ha⁻¹) were tested in two distinct sources (cuprous oxide and copper carbonate), together with phytosanitary treatments. Evaluations were made to determine the progression of Asian rust severity, micronutrient content in leaves and grains, as well as lignin content in leaves. The yield components and productivity were also evaluated. Foliar spraying with Cu retarded the disease progression, reducing the severity of Asian rust, positively influencing grain yield, but not significantly altering yield components. The Cu contents in the soybean leaves were influenced by foliar spraying, obtaining higher concentrations of this micronutrient. The contents of the Cu increased in the grains according to the applications performed. The amount of lignin present in the leaves was significantly altered with the application of the Cu associated to phytosanitary treatments. Thus, the studied copper sources can be used as a complementary tool for the management of Asian soybean rust.

Key words: 1. *Phakopsora pachyrhizi*. 2. *Glycine max* L. 3. Lignin 4. Severity. 5. Yield components.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 14 |
| 2.1 | <i>A cultura da soja</i> | 14 |
| 2.2 | <i>Ferrugem-asiática da soja</i> | 16 |
| 2.3 | <i>Redução da sensibilidade do fungo <i>Phakopsora pachyrhizi</i> aos fungicidas</i> | 19 |
| 2.4 | <i>Mecanismos de resistência de plantas a patógenos</i> | 23 |
| 2.4.1 | <i>Lignina e a proteção foliar</i> | 30 |
| 2.5 | <i>Nutrição foliar e a proteção fitossanitária</i> | 32 |
| 2.5.1 | <i>Cobre</i> | 38 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 41 |
| 3.1 | <i>Sujeito da pesquisa</i> | 41 |
| 3.2 | <i>Tratamentos e delineamento experimental</i> | 42 |
| 3.3 | <i>Procedimentos experimentais</i> | 42 |
| 3.4 | <i>Caracterização do potencial hidrogeniônico (pH) e da condutividade elétrica (CE) das caldas fitossanitárias</i> | 44 |
| 3.5 | <i>Avaliação da severidade da ferrugem-asiática</i> | 47 |
| 3.6 | <i>Caracterização dos componentes do rendimento de grão e da produtividade</i> | 47 |
| 3.7 | <i>Análise de micronutrientes em grãos e folhas de soja</i> | 48 |
| 3.8 | <i>Análise de lignina foliar</i> | 48 |
| 3.9 | <i>Análise estatística</i> | 49 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 50 |
| 4.1 | <i>Severidade da ferrugem-asiática da soja</i> | 50 |
| 4.2 | <i>Componentes do rendimento e produtividade de grãos</i> | 53 |
| 4.3 | <i>Micronutrientes em folhas de soja</i> | 57 |
| 4.4 | <i>Micronutrientes em grãos de soja</i> | 62 |
| 4.5 | <i>Lignina</i> | 65 |
| 5 | CONCLUSÕES | 69 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 70 |
| | ANEXOS | 86 |
| | APÊNDICES | 87 |

1 INTRODUÇÃO

A população mundial deverá alcançar nove bilhões de pessoas em 2050 (FAO, 2017), precisando a agricultura dobrar a produção de alimentos (RAY et al., 2013). Nesse sentido, à medida que a população mundial continua crescendo, muitos esforços e inovações serão necessários para aumentar a produção agrícola de maneira sustentável, com vista a melhorar a cadeia de suprimentos global, diminuindo as perdas e desperdícios de alimentos, buscando garantir também uma maior produtividade (FAO, 2017). Esse suprimento deverá acontecer de forma sustentável, a fim de garantir alimentos seguros para o combate da fome mundial (HUSSAIN et al., 2015).

No Brasil, a soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é a cultura de maior importância econômica devido a sua versatilidade. É usada como fonte de óleo e proteína, sendo matéria-prima de inúmeros produtos na indústria alimentícia, cosméticos, alimentação humana, alimentação animal e produção de biodiesel. É o produto agrícola com a maior participação no Produto Interno Bruto (PIB), sendo o país o segundo maior produtor e maior exportador mundial do grão (CONAB, 2017). Na safra 2017/2018 a área semeada com o grão chegou a 35,1 milhões de hectares, totalizando 116,9 milhões de toneladas, o que corresponde a uma produtividade média de 3.333 kg ha⁻¹ (CONAB, 2017). O Rio Grande do Sul, terceiro estado maior produtor do grão, totalizou 16,96 milhões de toneladas, produzidas numa área de 5,69 milhões de hectares, obtendo produtividade média de 2.981 kg ha⁻¹ (CONAB, 2017).

Em decorrência do avanço das tecnologias, melhoramento genético, produção e mercado para a cultura da soja, têm sido considerados de extrema importância o aumento da produtividade de grãos e resistência a pragas e doenças, sendo esses elementos de interesse agrônomo, pois os mesmos elevam o custo de produção.

A doença fúngica mais importante e que mais impacta em perdas de produtividade na cultura da soja é a ferrugem-asiática da soja (FAS), causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi* Sydow e Sydow (REIS et al., 2012), com perdas de produtividade que chegam a 80% (KAWUKI; ADIPALA; TUKAMUHABWA, 2003). As doenças em geral causam alterações no comportamento das plantas, mudando a estrutura e a fisiologia das mesmas, resultando em danos parciais ou totais em seus órgãos (AGRIOS, 2004). Os maiores danos da FAS estão relacionados à desfolha precoce, causando redução na produtividade por interferir diretamente na fotossíntese, resultando num menor número de legumes, número de sementes por legumes e menor massa de mil grãos (FIALLOS, 2011; GODOY et al., 2017).

As estratégias de controle da FAS exigem uma combinação de medidas para evitar ou minimizar as perdas. Vazio sanitário, a eliminação de plantas hospedeiras voluntárias durante a entressafra, o uso de cultivares de ciclo curto com menor período de exposição em áreas de alta pressão da doença, o escalonamento de semeadura de forma que as fases de maior sensibilidade da cultura não coincidam com épocas de alta pressão da doença (período crítico: início da floração e enchimento de grãos), a utilização de cultivares resistentes e a aplicação de fungicidas são as medidas integradas de controle recomendadas (FIALLOS, 2011; GODOY et al., 2017).

Uma maior resistência das culturas a pragas e doenças é indispensável para minimizar as perdas de produtividade e facilitar o manejo das mesmas. Diante disso, o uso de cultivares resistentes e/ou tolerantes apresenta-se como técnica de controle considerada eficiente, além de ser adequado às práticas de conservação do ambiente. No desenvolvimento de cultivares com resistência a FAS, o empilhamento de genes tem indicado que a variabilidade genética do patógeno é grande, o que leva a quebra de resistência de cultivares de soja em um curto espaço de tempo (GARCIA, 2008).

Dentre essas medidas integradas de manejo, a mais comumente empregada é a utilização de fungicidas, que são compostos químicos com ações sistêmica, curativa e eradicante. O uso indevido de fungicidas, a aplicação em momento inadequado ou a falta do manejo integrado de controle resulta em aumento do custo de produção e perda de eficiência no controle do patógeno (GODOY; CANTERI, 2004; SCHMITZ et al.,

2014). No ano de 2016, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) suspendeu 63 fungicidas utilizados no Brasil para o controle da FAS devido à baixa eficácia de controle (MAPA, 2017).

Esses fungicidas, antes registrados para o controle da doença, tiveram sua eficiência reduzida por adaptação do fungo (MAPA, 2017). Novas moléculas químicas tendem a ter um melhor desempenho no controle da doença nos primeiros anos após o seu lançamento, decaindo com o passar do tempo pelo uso contínuo dos mesmos grupos químicos e princípios ativos, o que corrobora para a seleção dos patógenos resistentes, desempenhando papel importante no cenário atual de produção de soja (GELAIN, 2011; GARDIANO, 2010).

Dentro do manejo integrado da FAS, uma alternativa de baixo custo inicial é a indução da resistência natural das plantas por meio do uso de agentes externos (STADNIK, 2000). O máximo de resistência natural encontrado nas plantas ocorre quando o manejo da nutrição propicia uma condição fisiológica ideal, onde o excesso ou a carência de um ou mais elementos, afeta diretamente esse equilíbrio (CHABOUSSOU, 1995). Cada planta possui uma característica genética de resistência, podendo essa dificultar o processo de infecção do patógeno e desenvolvimento da doença. É possível então utilizar essas características para auxiliar no controle químico da FAS (CARVALHO; BARCELLOS, 2012).

Os micronutrientes, apesar de serem necessitados em menor quantidade que os macronutrientes, são os principais responsáveis pela indução de resistência (ZAMBOLIM; VENTURA, 1993), estando envolvidos principalmente nas ativações enzimáticas (MARSCHNER, 2012). O cobre (Cu) é um elemento essencial para a soja e sua deficiência pode limitar seu crescimento e produção (CARMO, 2012; BARBOSA et al., 2013). O Cu possui funções importantes no metabolismo primário (fotossíntese e respiração) e em rotas metabólicas de produção de compostos de resistência a penetração do patógeno (GUO et al., 2010) atuando também, na forma direta, como fungicida e bactericida dependendo de doses e fontes utilizadas (CARVALHO; CUNHA; SILVA, 2012).

A deficiência de Cu nos tecidos das plantas pode ocorrer devido às baixas concentrações no solo, as condições de pH elevado, ao excesso de matéria orgânica ou de nitrogênio (N), fósforo (P) e zinco (Zn) nas adubações, ou mesmo, pela falta de aeração no solo, de maneira a formar compostos de Cu insolúveis em água (ABREU et al., 2007). A deficiência afeta diretamente a anatomia das folhas, prejudicando a lignificação celular e vasos do xilema, deixando a planta vulnerável ao ataque de agentes bióticos e abióticos (MARSCHNER, 2012).

Se as aplicações foliares de Cu interferem no manejo da FAS da soja, então as aplicações foliares desse micronutriente são capazes de retardar o progresso da severidade da FAS, aumentando os componentes do rendimento de grãos e a produtividade, os teores de micronutrientes em folhas e grãos de soja e o conteúdo de lignina foliar, quando comparadas com plantas cultivadas sem a aplicação do Cu foliar. Desse modo, o objetivo desse trabalho foi verificar se as aplicações foliares de Cu, juntamente com as caldas fitossanitárias, interferem no manejo da FAS da soja pela redução da severidade da doença, incrementando os teores de Cu nas folhas e nos grãos, obtendo variação dos teores de lignina nos tecidos foliares, refletindo nos componentes de rendimento e na produtividade da soja.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da soja

A soja é uma planta oleaginosa, originária da região da Manchúria, na China, pertencente ao reino Plantae, divisão Magnoliophyta, classe Magnoliopsida, ordem Fabales, família Fabaceae (Leguminosae), subfamília Faboideae (Papilionoideae), gênero *Glycine*, espécie *Glycine max* (L.) Merrill (SEDIYAMA et al., 2009). É uma planta anual, sensível em função das condições climáticas, podendo assim apresentar características morfofisiológicas distintas (MEOTTI et al., 2012; BRUNETTO et al., 2013).

Com a difusão geográfica, a soja foi introduzida no Brasil, no ano de 1882, no estado da Bahia, no entanto, o primeiro registro de cultivo foi no município de Santa Rosa, no Rio Grande do Sul no ano de 1914. Somente em 1949, com a produção de 25 mil toneladas, o Brasil entrou no *ranking* dos países maiores produtores de soja. O rápido crescimento se deu estimulado pelos altos preços praticados no mercado internacional, adicionado ao desenvolvimento da tecnologia de produção, expansão da área de cultivo e cultivares mais adaptados às condições do país (FIALLOS, 2011).

Após a década de 1970, a produção nacional cresceu quando as áreas de cultivo se expandiram para o Centro-Oeste, passando de 1,3 milhões de hectares para 8,8 milhões de hectares. Consequentemente houve incremento na produtividade, passando da média de 1.140 kg ha⁻¹ para 1.730 kg ha⁻¹ (DIAS et al., 2009). Isso se deve principalmente à implementação do zoneamento agroclimático para a cultura; a adoção de agricultura de precisão; o acesso dos produtores às tecnologias modernas em tempo real; a integração das culturas com a pecuária e; especialmente, a adoção maciça do sistema plantio direto (CATTELAN; DALL'AGNOL, 2018).

Diante disso, a importância da soja para o setor agrícola brasileiro tem sido tão significativa que é possível dividir a sua expansão em dois períodos: antes e depois da soja. Além disso, é possível dividir o desenvolvimento da soja em dois estágios: desenvolvimento nos subtropicais (até 1980) e expansão nos trópicos (a partir dos anos 80), época em que o Brasil ganhou destaque nas exportações. Na safra 2017/2018, o Brasil chegou a segunda colocação como país maior produtor do grão, atrás dos Estados Unidos e obteve o primeiro lugar como maior país exportador (CONAB, 2017).

A extensão da área brasileira semeada com a cultura foi de 35,1 milhões de hectares, com produtividade média de 3.333 kg ha⁻¹, sendo os estados do Mato Grosso (31,8 milhões de toneladas), Paraná (19,0 milhões de toneladas) e Rio Grande do Sul (16,9 milhões de toneladas) os maiores produtores (CONAB, 2017). No Brasil, são produzidas aproximadamente 116 milhões de toneladas, das quais 50 milhões são consumidas internamente, principalmente na forma de ração animal e biodiesel e as outras 66 milhões de toneladas são exportadas principalmente para países asiáticos, gerando uma receita média de US\$ 19,3 bilhões (CONAB, 2017).

A soja tem impulsionado o recente desenvolvimento agrícola do Brasil, com significativo impacto econômico e social. Municípios que cultivam soja alcançaram índices de desenvolvimento humano superiores aos que não cultivam soja. Para avançar, o Brasil precisa usar os ativos que já possui: eficiência tecnológica para a produção em regiões tropicais, disponibilidade de terras aráveis e agricultores empreendedores (CATTELAN; DALL'AGNOL, 2018).

Frente a isso, a demanda global por soja e os preços de mercado associados determinarão quanto à produção brasileira de soja crescerá nos próximos anos, uma vez que mundialmente, 124,5 milhões de hectares são semeados com cultura da soja, com produção aproximada de 336,6 milhões de toneladas anuais e dessas, somente a China consome 86 milhões de toneladas do produto (CATTELAN; DALL'AGNOL, 2018).

Dado o clima tropical e a grande área cultivada, o Brasil enfrenta grandes desafios para controlar as pragas e doenças que afetam seus campos de produção. Como a soja é cultivada principalmente sob áreas de monocultivo, os problemas tendem a

aumentar (CATTELAN; DALL'AGNOL, 2018), sendo que a FAS é a responsável pelos aumentos dos custos de produção através do consumo da maior parte dos fungicidas pulverizados no Brasil. Embora tenha um genoma relativamente complexo, progressos significativos têm sido feitos no sentido de utilizar métodos de análise genômica e ferramentas citogenéticas moleculares para desenvolver cultivares resistentes, com alto teto produtivo. Esse número de cultivares resistente a estresses bióticos, estáveis e de alto rendimento serão testadas na decorrência das safras (LIMA et al., 2018).

A partir dessas considerações e por se tratar da doença de maior potencial de dano na soja, destaca-se a importância de encontrar novas estratégias de manejo para essa doença.

2.2 Ferrugem-asiática da soja

Destaca-se primeiramente que o Brasil é um dos maiores produtores agrícolas do mundo, tendo culturas anuais, semiperenes e perenes, florestas plantadas e pastagens. Nas culturas anuais, destaca-se a soja, com cultivares que possuem um potencial produtivo de aproximadamente 4500 kg ha⁻¹ (SEDIYAMA et al., 2015). O melhoramento genético é responsável pela metade desse acréscimo do potencial e a melhoria das práticas de manejo é responsável pela outra metade do ganho (WEIDENBENNE, 2014).

Observando as médias de produtividade, nota-se que existem fatores bióticos e abióticos, como as pragas e as doenças, que são responsáveis pelas quedas desses patamares produtivos. Na literatura são citadas mais de 100 doenças que afetam a cultura da soja, sendo que dessas, 40 são encontradas anualmente nos cultivos brasileiro (MATSUO; FERREIRA; SEDIYAMA, 2015) e esse número tende a aumentar devido principalmente à monocultura existente nas áreas de cultivo (SEDIYAMA et al., 2009).

A importância econômica de cada uma delas varia de acordo com a região de cultivo e com as condições climáticas enfrentadas durante uma safra agrícola (EMBRAPA, 2004). Em média, as perdas de produtividade devido a doenças são de

aproximadamente 20%, no entanto, algumas delas, como a FAS, podem ocasionar perdas de produtividade de até 80% (ALMEIDA et al., 2011; FIALLOS, 2011).

A FAS é causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi*, do filo Basidiomycota, classe Basidiomycetes, ordem Uredinales e família Phakopsoraceae, apresentando diferenciação em duas espécies: *Phakopsora meibomiae* e *Phakopsora pachyrhizi*, sendo esta segunda espécie a mais comum no Brasil (REIS et al., 2012). Por apresentar extensa gama de hospedeiros na família das fabaceas, na literatura ela é considerada a doença fúngica com maior capacidade destrutiva, capaz de causar perdas significativas especialmente na cultura da soja (REIS et al., 2006).

A FAS foi primeiramente descrita em 1903, no Japão (ONO et al., 1992), chegando ao Brasil em 2001, onde o patógeno encontrou condições extremamente favoráveis ao seu desenvolvimento, sendo que na safra onde foi verificado o primeiro foco, ocorreram perdas de produtividades de aproximadamente 50%. Após, devido a sua capacidade de disseminação através do vento, os esporos rapidamente espalharam-se por todo o continente (GODOY et al., 2016).

A infecção pelo fungo ocorre de forma direta através da cutícula foliar e não via estômatos. Este processo infeccioso depende de uma sequência de eventos, iniciada pela germinação dos esporos, formação do apressório e penetração nos tecidos foliares e posterior formação do haustório. Tendo nas condições climáticas de temperaturas entre 15 e 28 °C (ótima 22,5 °C) e molhamento foliar superior a seis horas, as condições ideais de desenvolvimento (REIS et al., 2012; GODOY et al., 2017).

Entretanto, na literatura existem relatos de germinação de esporos entre as temperaturas de 5 até 30°C. Para que ocorra uma epidemia severa, é necessário que haja no mínimo 10 horas de molhamento foliar, devido à chuva ou orvalho e não ocorra radiação solar superior a cinco horas, pois esta causa efeitos deletérios, inibindo parcialmente a germinação dos esporos (NICOLINI et al., 2010; ALMEIDA et al., 2011).

O início da epidemia pode ocorrer de inóculo vindo de longas distâncias ou estar presente em outros hospedeiros, os quais a literatura cita serem mais de 80 espécies

(YEH, 2004). Os primeiros sintomas da doença, geralmente iniciam nos trifólios do terço inferior da planta, com minúsculos pontos escuros na folha, de coloração esverdeada a cinza-esverdeada, com protuberância na face inferior da folha (REIS et al., 2006).

Os sintomas da FAS podem ocorrer em qualquer estágio de desenvolvimento e em diferentes partes da planta, a cor das lesões é diversificada e em seu estado inicial, podem ser confundidos com outras doenças (ANTUNIASSI, 2012). Progressivamente, as pústulas adquirem coloração castanho-clara a castanho-escura, abrem-se em poros minúsculos, liberando os uredosporos. O estágio final da epidemia da FAS é caracterizado pelo amarelecimento da folhagem e intensa desfolha, impedindo a completa formação e enchimento dos grãos, impactando significativamente no tamanho e na qualidade das sementes (FIALLOS, 2011; ALMEIDA et al., 2011; REIS et al., 2012).

As epidemias de FAS podem progredir desde abaixo dos níveis detectáveis até a desfolhação total em um mês. Epidemias parecem progredir ainda mais rapidamente do que isso, porque infecções precoces ocorrem no dossel inferior e são difíceis de detectar. Além do ambiente, a idade das plantas afeta as epidemias de FAS. Isso devido à maior suscetibilidade das plantas, à medida que elas entram nos estágios reprodutivos, desenvolvem maiores índices de área foliar, deixando os esporos do dossel inferior da planta mais protegidos da radiação ultravioleta, ou pelas condições no dossel estarem mais propícias, com maior umidade pelo fechamento da entrelinha (GODOY et al., 2017).

Para sobreviver na entressafra, o fungo depende nutricionalmente de plantas vivas, seja ela soja voluntária ou outro hospedeiro natural, sendo assim classificado como fungo biotrófico, e sua intensidade é influenciada pela periodicidade de chuvas ao longo do ciclo da cultura. Nesse argumento, embora a transmissão não tenha sido efetivamente documentada, existe a preocupação de que lotes de sementes que contenham pequenas quantidades de restos de plantas infectadas são capazes de espalhar o patógeno (REIS et al., 2006; DURÃO & BOLLER, 2017).

Diante disso, para obter um controle satisfatório da FAS, se faz necessário a utilização de práticas de manejo integradas, unindo medidas culturais, químicas e biológicas, como: o monitoramento periódico das lavouras, utilização de cultivares resistentes, evitando semeaduras adensadas e preferencialmente de ciclo curto ou precoce, respeitando o vazio sanitário, eliminando plantas voluntárias de soja ou hospedeiras e a utilização de fungicidas, os quais devem ser aplicados preventivamente na cultura, pois ocorre redução da sua eficiência quando utilizados após a infecção do patógeno (HENNING, 2014).

Devido à grande variabilidade genética do patógeno da FAS, a utilização de defensivos agrícolas para o controle da doença, tem sido um desafio para agricultores e pesquisadores (ANTUNIASSI, 2012), tornando-se imprescindível compreender a redução da sensibilidade dos fungos aos fungicidas.

2.3 Redução da sensibilidade do fungo *Phakopsora pachyrhizi* aos fungicidas

Os defensivos agrícolas são utilizados em larga escala há muitos anos, devido a sua eficácia em controlar uma ampla variedade de insetos, doenças e plantas daninhas que ocorrem nas lavouras comerciais. Sem o uso desses produtos, a produção de alimentos e sua qualidade seriam severamente afetadas, colaborando para o aumento dos riscos de escassez de alimentos (JULIATTI et al., 2014).

Substâncias com propriedades fúngicas já eram utilizadas pelas antigas civilizações, onde as pessoas, através de suas experiências, descobriram a efetividade de certos produtos contra o que denominavam de pestes. Graças à química moderna ocorreu um progresso no conhecimento dos fungicidas, surgindo outras moléculas a partir do século XVIII (JULIATTI et al., 2014).

Embora existam diversas práticas de manejo integrado da FAS, o método mais comumente empregado é o controle químico com fungicidas, basicamente pela facilidade de uso quando comparado aos outros métodos e por gerar resultados visuais rápidos de controle. O sucesso do controle químico depende da quantidade de ingrediente ativo que atinge o alvo biológico e de uma adequada tecnologia de

aplicação, bem como da definição do volume de calda, à estrutura da planta, o intervalo entre as linhas de semeadura, qualidade da água e do mesmo modo atender às condições climáticas favoráveis na hora da aplicação (DELEN; TOSUN, 2003).

Os fungicidas são substâncias de origem natural ou sintética, que protegem as plantas contra a invasão dos patógenos em seus tecidos e em alguns casos são utilizados para erradicar infecções já estabelecidas. Para o controle da FAS, são utilizados principalmente triazóis, estrobilurinas, carboxamidas, ditiocarbamatos e isoftalonitrilas (TWIZEYIMANA; HARTMAN, 2017).

Os fungicidas pertencentes ao grupo dos triazóis são classificados como orgânicos e atuam na inibição da desmetilação do carbono 14 (C-14) na biossíntese de esteróis fúngicos, promovendo desorganização nas estruturas celulares. Praticamente todos os compostos desse grupo têm ação sistêmica, os quais são absorvidos e redistribuídos dentro da planta na forma acropetal. São comumente caracterizados como inibidores da biossíntese de esteróis ou inibidores de desmetilação (DMI). Por apresentar elevada fungitoxicidade, rápida penetração e translocação nos tecidos vegetais, podem atuar com ação protetora, apresentando ação tóxica na germinação dos esporos e/ou formação do tubo germinativo e do apressório (FORCELINI, 1994).

As estrobilurinas pertencem ao grupo de produtos químicos classificados como fungicidas inibidores da quinona (QoI), as quais foram sintetizadas a partir de um metabólito secundário produzido por um fungo chamado *Strobilurus tenacelluse*. Este grupo bloqueia o transporte de elétrons no sítio de oxidação de quinol do complexo do citocromo b (complexo III) na mitocôndria, interrompendo a produção de ATP e inibindo a respiração mitocondrial. São fungicidas que preferencialmente atuam preventivamente a FAS, inibindo a germinação dos esporos, possuindo baixa ação curativa, erradicante e antiesporulante. Já existem casos de resistência de fungos as estrobilurinas (RODRIGUES, 2006). Fazem parte desse grupo os compostos azoxistrobina, picoxistrobina, piraclostrobina, fluoxastrobina, trifloxistrobina, cresoxim-metílico, entre outros princípios ativos (RODRIGUES, 2006).

As carboxamidas inibem a fosforilação da cadeia respiratória, inibindo o complexo II (succinato-desidrogenase), interrompendo o transporte de elétrons e a respiração dos fungos (TWIZEVIMANA; HARTMAN, 2017). Alguns fungos já têm apresentado resistência as carboxamidas, caracterizado-se assim como de médio risco a quebra de resistência (FRAC, 2017). É importante que esse grupo químico seja usado em combinações com outros ativos, evitando assim a seleção de biótipos resistentes de fungos e aumentando a sua eficiência de controle (TWIZEVIMANA; HARTMAN, 2017). Os principais representantes do grupo das carboxamidas são benodanil, fenfuran, flutolanil, mepronil, furametpyr, fluxapiroxade e benzovindiflupir e bixafen (RODRIGUES, 2006).

Ditiocarbamatos são os fungicidas mais antigos existentes, derivados do ácido carbâmico, o qual não possui vida livre na natureza, precisando ser sintetizado. São considerados fungicidas protetores de amplo espectro, caracterizados por serem não-sistêmicos, formando uma capa protetora no limbo foliar, atuando de forma curativa ou erradicante (RODRIGUES, 2006). Possuem atividades em vários sítios ativos de enzimas, com a capacidade de interferir em diversos processos, sendo conhecidos como fungicidas multissítios (LAI et al., 2016). São classificados em cinco grupos: bissulfitos de tetrametil tiuram (tiram), dimetil ditiocarbamatos metálicos (ferbam, ziram), etileno bisditio (propineb) e N-metil carbamato de sódio (metam-sódio) (AZEVEDO, 2003). Esses compostos fúngicos apresentam baixo risco de quebra de resistência devido à atuação em inúmeros sítios ativos. Nesse grupo estão o mancozebe, ferbam, maneb, metiram, propineb, zineb, dentre outros (RODRIGUES, 2006).

As isoftalonitrilas se caracterizam por não possuir ação sistêmica, entretanto são fungicidas com ação protetora de amplo espectro no controle, sendo recomendados usos isolados ou na mistura com outros grupos químicos. Apresentam baixos riscos de quebra de resistência, igualmente ao grupo dos ditiocarbamatos, devido à atividade multissítios e a baixa pressão de uso comercial. O clorotalonil é o principal representante deste grupo (RODRIGUES, 2006).

Porém, ao analisar a eficiência dessas moléculas fúngicidas na erradicação da FAS, é possível observar que as moléculas com sítio específico de ação, decaem ao

longo dos anos, não tendo controles desejados em decorrência da adaptação desses fungos. As razões existentes para a queda de desempenho ao longo dos anos estão baseadas no uso contínuo dos mesmos mecanismos de ação e princípios ativos, conciliadas as pulverizações errôneas dos produtos, permitindo a seleção e o aumento da população dos fungos resistentes (TWIZEVIMANA; HARTMAN, 2017).

As aplicações químicas preventivas podem ser eficazes no controle da FAS, mas o contínuo uso na ausência de sintomas é desnecessário, podendo resultar em aumento dos custos de produção e causar consequências imprevistas devido à atividade em fungos não-alvo (ANTUNIASSI, 2012). Quando os fungicidas são usados de forma curativa, os números de aplicações requeridas para o controle da doença aumentam, tornando-se depende dos compostos usados e das condições meteorológicas subsequentes para o desenvolvimento continuado da doença (TWIZEYIMANA; HARTMAN, 2017).

Assim como qualquer organismo, os fungos se tornam mais agressivos com o passar dos anos, tendo na capacidade de mutação, o mecanismo que lhe permite sobreviver em condições adversas. Não existem mudanças nos fungicidas, mas existe uma seleção desses fungos mutantes que são capazes de sobreviver, mesmo sendo expostos a uma concentração de princípio ativo que anteriormente era letal a sua população (REIS et al., 2012).

Frente a isso, é necessário levar em consideração que a eficiência de um tratamento depende não somente da quantidade do material depositado sobre a vegetação, mas também da efetividade dessa molécula (FUMIKO, 2013). O FRAC (*Fungicide Resistance Action Committee*) recomenda não utilizar um mesmo mecanismo de ação por um longo período de tempo ou em áreas extensas, durante vários anos agrícolas. A associação de produtos de diferentes grupos químicos (triazóis, estrobilurinas, carboxamidas, ditiocarbamatos e isoftalonitrilas) é uma estratégia antirresistência, devido ao fato destas moléculas atuarem de maneiras distintas nos organismos alvos (TWIZEYIMANA; HARTMAN, 2017).

Soma-se a isto, a importância de realizar o monitoramento, identificando a intensidade da doença no campo, ao lado das condições ambientais existentes, as quais são essenciais no manejo integrado de doenças da cultura da soja (FIALLOS, 2011; FUMIKO, 2013), gerenciando dessa forma o desenvolvimento de populações resistentes. Buscando-se uma melhor qualidade na tecnologia de aplicação de defensivos, devem-se considerar todos os critérios essenciais para o sucesso de seu aproveitamento como: deriva, dose correta, tamanho de gotas, condições climáticas, volume de calda entre outros (ANTUNIASSI, 2015).

As plantas de maneira natural reagem aos fitopatógenos, sendo necessário compreender melhor esses processos, podendo essa ser uma ferramenta no auxílio no controle de doenças. Algumas dessas resistências naturais estão presentes mesmo antes do patógeno entrar em contato com as células das plantas, sendo esse atributo denominado de mecanismo de resistência, tema que será abordado a seguir.

2.4 Mecanismos de resistência de plantas a patógenos

Naturalmente as plantas são fontes nutricionais para animais e microrganismos e procuram se preservar intactas produzindo inúmeras substâncias de defesas (GARCION et al., 2007). As plantas têm a capacidade de atrasar ou impedir o começo e atividade de uma doença em seus tecidos e isso é conhecido como resistência fisiológica, sendo a resistência julgada como regra e a suscetibilidade uma exceção (GOODMAN et al., 1986).

Por não apresentarem um sistema imunológico e por estarem fixas ao solo, as plantas evoluíram suas defesas naturais, aperfeiçoando suas células (HAMMOND-KOSACK; JONES, 2000; ALFARO; TROJAN, 2018). As substâncias produzidas pelas plantas alteram-se conforme o patossistema encontrado, variando em relação à idade, ao tecido afetado, ao órgão atingido, estado nutricional e as condições ambientais (JOHAL et al., 1995).

As plantas apresentam capacidade de reconhecer a invasão de agentes patogênicos e de desenvolver diversos mecanismos de defesa elaborados contra a

ameaça de ataque (AZEEZ, 2015). Alguns desses mecanismos são expressos constitutivamente e constituem-se de barreiras físicas e químicas, enquanto em outros, a sua produção é induzida somente após o ataque do patógeno. O processo geralmente se inicia com hospedeiro reconhecendo o patógeno, através de sinais vindos do mesmo, desenvolvendo uma cascata de transdução de sinais e uma rápida modificação na programação gênica, codificando a partir disso, enzimas e proteínas específicas as quais tem funções de defesa nas plantas (ALFARO; TROJAN, 2018).

Os mecanismos estruturais pré-formados a infecção fundamentam-se em impedimentos e estruturas de defesa já existentes na forma natural das plantas (ceras, cutícula, tricomas, estômatos, fibras e vasos condutores). As ceras e a cutícula, por exemplo, cobrem a epiderme das células e são os primeiros obstáculos enfrentados pelos patógenos para infectar uma planta, antes mesmo de entrar em contato com o tecido celular (LANGENBACH et al., 2016). As ceras na face externa das folhas e frutos formam uma superfície com a finalidade de repelir a água e, dessa forma impede o seu acúmulo e, conseqüentemente a aglomeração de patógenos, assim como dificulta o desenvolvimento dos tubos germinativos dos esporos dos fungos. Do mesmo modo, a camada espessa de tricomas, geralmente localizada na superfície externa das folhas, pode exercer um propósito similar, dificultando o processo de invasão e até mesmo de infecção (LANGENBACH et al., 2016).

A presença da cutícula é um fato que também pode colaborar e dificultar a infecção pelo patógeno. Contudo, a espessura de cutícula não é prontamente relacionada à maior resistência das plantas, sendo que em muitas culturas a penetração é facilitada, mesmo tendo uma camada espessa de cutícula (YAMORI, 2016). Soma-se a isto, a espessura e solidez de paredes externas de células da epiderme, tornando a penetração direta do fungo extremamente difícil. As plantas que apresentam este tipo de parede são, em via de regra, resistentes, apesar disso, o agente patogênico pode penetrar por meio de ferimentos, tendo acesso aos tecidos internos das células com relativa facilidade (ALFARO; TROJAN, 2018). As células espaçadas do esclerênquima, expressas na maioria dos cereais de importância agrônômica, podem dificultar a proliferação de patógenos (GATIBONI, 2015). Vale lembrar, que alguns fungos e bactérias patogênicas

têm a capacidade de penetrar nas plantas por meio dos estômatos, porém, para a maioria deles a entrada se dá através da cutícula (TOMAR et al., 2016).

As substâncias que compõem o mecanismo bioquímico pré-formado são principalmente de natureza química, como fenóis, alcalóides, lactonas, terpenóides e algumas proteínas. Um composto característico de defesa pré-formada descrito na literatura é a avenacina nas raízes da aveia, a qual impede a infecção do fungo causador do mal-do-pé em trigo (*Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*) (TAIZ & ZEIGER, 2017).

Os compostos fenólicos compreendem um grande grupo de substâncias, os quais são utilizados como substratos para a formação das ligninas. Inclui-se os fenóis simples e glicosilados, cumarinas e isocumarinas, flavonóides, quinonas e derivados dos ácidos benzóico e cinâmico, sintetizados principalmente via rota do ácido shiquímico e cinâmico. Esses compostos possuem efeitos fungitóxicos e antibacterianas, com ação inibitória na germinação de esporos e crescimento micelial (LO; NICHOLSON, 2008; SCHWAN-ESTRADA et al., 2008).

Os patógenos buscam a colonização no hospedeiro através da superfície da folha, rompendo as barreiras iniciais de proteção através da produção de algumas enzimas específicas, capazes de consumir ou modificar a parede celular e as demais barreiras físicas, como a cutinase e a pectina. (MUSSUARY, 2012). Apesar de existir as estruturas de defesa pré-formadas superficiais ou internas, muitos agentes patogênicos possuem a capacidade de penetração em seus hospedeiros, podendo assim evoluir para tecidos internos das plantas. Contudo, mesmo após romper os mecanismos de defesa pré-formadas, as plantas frequentemente contrapõem com a constituição de novas barreiras ou substâncias de defesa, chamadas de estruturas ou compostos pós-formados (ALFARO; TROJAN, 2018).

Os mecanismos estruturais pós-formados dividem-se em barreiras histológicas e barreiras celulares, com a função de proteção a penetração dos patógenos, porém essas substâncias encontram-se em pequenas quantidades nos tecidos sadios das plantas e sua síntese é aumentada em função de um estímulo. Como exemplos de barreiras

histológicas podemos citar as camadas de cortiça, camadas de abscisão, tiloses e a deposição de gel e cristais. Já as barreiras celulares são as papilas, halos e a lignina (PASCHOLATI & CIA, 2009).

Na presença de algum agente patogênico, as plantas interpretam essa presença através de compostos excretados pelos patógenos e induz seus tecidos a formação de camadas de células corticosas, próximas ao ponto de infecção. Esses tecidos, por sua vez dificultam a colonização do patógeno nos sítios de infecção, bloqueando também a secreção de substâncias produzidas pelos patógenos (TOMAR et al., 2016).

As estruturas histológicas de defesa desenvolvidas pelas plantas estão localizadas em tecidos próximos ao ataque patógeno; outras estão associadas às paredes de células invadidas; o processo de defesa do citoplasma, que se dá em sua periferia, é chamado reação de defesa citoplasmática (TOMAR et al., 2016).

No mecanismo bioquímico pós-formado, a produção das substâncias ocorre após a infecção do patógeno, em resposta à infecção dos mesmos, como exemplo de algumas fitoalexinas e das espécies reativas de oxigênio, sendo que o tempo de proteção das plantas depende do intervalo entre a aplicação dos indutores de resistência e o ataque do patógeno (GARCION et al., 2007). Dependendo da reação da planta ao indutor, o mecanismo de resistência pode ser ativado por período indeterminado, durando até a senescência da planta, ou pode necessitar de várias aplicações de indutores para manter o efeito de proteção (PASCHOLATI, 2011).

A indução de resistência, também conhecida como resistência sistêmica adquirida, é um processo pelo qual as plantas são estimuladas a produzir compostos de defesa, ou mecanismos latentes de proteção, a partir do tratamento com os chamados elicitores (agentes bióticos ou abióticos), de variada natureza (BONALDO et al., 2005) podendo ela ser empregada no manejo integrado de doenças (PASCHOLATI; CIA, 2009). Uma vez que a planta reconhece o agente patogênico, desencadeia respostas celulares que impedirão o processo de infecção e/ou colonização. A partir do reconhecimento, que incide pela interação da planta com o microorganismo, decorre a

transdução do sinal externo, intensificação de mensageiros secundários e a ativação dos genes específicos de defesa (BARROS et al., 2008).

Esse processo ocorre pelo estímulo do receptor, localizado na superfície da célula vegetal e por meio dele o sinal primário é conduzido para o interior da célula, acionando os mensageiros secundários, que ampliam o sinal e acondicionam a expressão de genes específicos, gerando o desenvolvimento de intercâmbios compatíveis (doença) ou incompatíveis (resistência) (BARROS et al., 2008; TOMAR et al., 2016).

Dentre alguns dos mecanismos de defesa latentes ativados estão: o acionamento de genes de defesa; produção de espécies reativas de oxigênio, que originam uma reação de hipersensibilidade; produção de compostos tóxicos aos patógenos, como as fitoalexinas; e síntese de compostos estruturais, capazes de alterar a estrutura da parede celular, como o exemplo da lignina.

As espécies reativas de oxigênio (ROS) são moléculas produzidas continuamente pelas plantas. A adição de um elétron no oxigênio molecular transforma-o em radical ou ânion superóxido (FINKEL, 2000). Posteriormente, o superóxido pode sofrer reações de óxido-redução ou ser "dismutado" e regenerar O_2 e peróxido de hidrogênio (H_2O_2). As espécies reativas de oxigênio mais comuns são o oxigênio singlete (1O_2), radical superóxido (O_2^-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o radical hidroxila (OH^\bullet) (FINKEL, 2000).

Na literatura, o peróxido de hidrogênio era conhecido apenas por ser uma substância tóxica as células, no entanto novos estudos verificaram outras funcionalidades, indicando que ele também atua como molécula sinalizadora, controlando diferentes estímulos e respostas celulares (FINKEL, 2000). Quando ocorre um estresse decorrente de um ataque de fitopatógenos, as plantas rapidamente sintetizam essas moléculas e as liberam no apoplasto (RAO; DAVIS, 2001). Por ele ser continuamente produzido, a planta necessita fazer um controle rigoroso de seus níveis celulares e a responsável por isso é a enzima catalase, a qual se encarrega de degradar a água e oxigênio molecular (YANG; POOVAIAH, 2002).

A reação de hipersensibilidade (HR), considerada por muitos pesquisadores a principal forma de defesa ao ataque de patógenos, é geralmente a primeira resposta da planta a infecção, ocorrendo de forma rápida e localizada nos tecidos atacados pelo patógeno (AGRIOS, 2004; YAMORI, 2016). No caso de patógenos biotróficos, como é o caso do agente causador da FAS, a resposta hipersensível ocasiona a morte do fungo por falta de alimentação, pois os tecidos próximos ao sítio de infecção entram em colapso celular, liberando substâncias tóxicas ao desenvolvimento do hospedeiro, levando-o à morte (AGRIOS, 2004). No caso de fungos hemibiotróficos ou necrotróficos, essa resposta ainda não está totalmente esclarecida, pois os mesmos se nutrem de células mortas, onde o colapso e morte celular beneficiaria o progresso dos patógenos (FERNANDES et al., 2006).

Outros compostos produzidos a partir de um estímulo externo ou em resposta a estresses físicos, químicos ou biológicos são as fitoalexinas, sintetizadas pelo metabolismo secundário, possuindo baixo peso molecular e com funções biocidas e antimicrobianas (STANGARLIN et al., 2008). A literatura cita uma ampla diversidade de fitoalexinas, das quais mais de 300 tipos já foram caracterizados (SMITH, 1996). De maneira geral, as fitoalexinas são capazes de inibir a germinação dos esporos, crescimento do tubo germinativo e apresentam capacidade de reduzir o desenvolvimento micelial, reduzindo a capacidade de infecção dos fungos patogênicos (BRAGA, 2008). Em soja, plantas infectadas pela FAS produzem e acumulam de forma mais rápida as fitoalexinas gliceolina (LANGENBACH et al., 2016).

Existem também substâncias que são pré ou pós-formadas, exemplo das proteínas relacionadas à patogênese (PR-Proteínas). Em vegetais, já se conhece 17 famílias dessas proteínas, as quais apresentam diferentes funções (GORJANOVIC, 2009) sendo as peroxidases, quitinases e β -1,3-glucanases as principais proteínas envolvidas (HAMMOND-KOSACK; JONES, 2000). Algumas delas são encontradas de forma constitutiva nas plantas, de forma natural, embora em níveis baixos. Entretanto, em condições adversas de estresse seus níveis são aumentados. Existem outras que, não são detectadas em condições normais das plantas, entretanto têm seus genes correspondentes ativados após uma injúria decorrente de fatores ambientais, ataque de

patógeno ou pragas, salinidade, estresse hídrico ou variações de temperaturas, vindo a ser detectadas nesses tecidos vegetais (MARTINS-MIRANDA, 2002).

Entre as principais enzimas relacionadas à defesa das plantas estão a peroxidase e a fenilalanina amônia-liase. As peroxidases contribuem para o fortalecimento das paredes celulares através do depósito e acúmulo de ligninas, formadas pela catalise e a oxidação do álcool hidroxicinâmico, na presença de peróxido de hidrogênio. Outras funções ligadas as peroxidases estão na biossíntese do hormônio vegetal etileno, na oxidação de compostos fenólicos e na oxidação do ácido indolacético (AIA) (ISHIGE et al., 1993). Em alguns patossistemas, as mudanças bruscas na atividade das peroxidases têm relação com alguma resposta de resistência e/ou suscetibilidade, embora isso também esteja ligada a outras enzimas, num processo mais complexo.

A fenilalanina amônia-liase, outra importante enzima do metabolismo secundário, possui a função de desaminação da L-fenilalanina, gerando ácido transcinâmico e amônia. Na produção de compostos fenólicos, este ácido é incorporado, formando ésteres, cumarinas, flavonóides e ligninas (SCHWAN-ESTRADA et al., 2008). As quitinases e glucanases possuem funções antifúngica e antibacteriana, com capacidade de degradar as paredes estruturais dos fungos, induzindo alterações na arquitetura ou prejudicando o livre desenvolvimento do microrganismo (ZAREIE et al., 2002).

A indução destas proteínas pode ocorrer por elicitores endógenos, da própria planta; e elicitores exógeno, do patógeno ou meio externo, chamado de indução biótica (CHRISTENSEN et al., 2002). Dentre eles incluem-se alguns hormônios e micronutrientes.

Assim sendo, as plantas apresentam de forma natural ou induzida uma série de barreiras e substâncias capazes de auxiliar os fungicidas no controle de determinadas doenças, dentre elas a deposição de lignina, dificultando o progresso dos fungos no interior dos tecidos. Devido a essa importância, esse composto será detalhado na sequência.

2.4.1 Lignina e a proteção foliar

As atividades de fotossíntese, respiração, crescimento e desenvolvimento das plantas são gerenciadas pelo metabolismo primário, essencial para a sua sobrevivência das plantas. A partir dele, os vegetais produzem compostos orgânicos, chamados de metabólitos secundários, ou seja, produtos naturais que possuem especificidade nas plantas (TAIZ & ZEIGER, 2017).

Alguns desses metabólitos secundários são os compostos fenólicos, os quais são produzidos através de duas rotas metabólicas: (rota do ácido chiquímico e a rota do ácido malônico). A maioria dos fenóis existentes nas plantas é sintetizada via rota do ácido chiquímico e a rota do ácido malônico é utilizada pelos fungos e bactérias para a produção de fenólicos secundários (TAIZ & ZEIGER, 2017).

A lignina é a terceira substância orgânica mais abundante nas plantas, ficando atrás apenas da celulose e hemicelulose (SAAD, 2010), sendo sintetizada durante todo o período de crescimento das plantas (HENDRIKS; ZEEMAN, 2009), com a função vital de proteção das plantas a ataques biológicos. Ao lado da lignina, a suberina funda-se em polímeros fenólicos resistentes a degradação enzimática compondo uma importante barreira as invasões de patógenos fúngicos (AGRIOS, 2004). A lignina é originada de uma reação dependente de H_2O_2 , mediada pela enzima peroxidase, caracterizada por ser uma macromolécula tridimensional amorfa, composta por unidades de fenilpropano, presente principalmente na lamela média e na parede secundária (TAIZ & ZEIGER, 2017).

Através de moléculas sinalizadoras, chamadas de hormônios vegetais, as plantas conseguem sinalizar internamente o ataque de invasores ao seu sistema de defesa. Até recentemente, acreditava-se na existência de apenas cinco hormônios vegetais: auxinas, giberelinas, citocininas, etileno e ácido abscísico, os quais eram os prováveis responsáveis pela regulação e pelo desenvolvimento vegetal. Entretanto, após estudos mais concretos, foi comprovada a existência de outros hormônios vegetais, tais o como ácido jasmônico, ácido salicílico, glicoxilanas e polipeptídios sistemina (TAIZ; ZEIGER, 2017).

A PAL é uma enzima importante para a biossíntese de fenóis, pela via fenilpropanóides, rota biosintética de formação de metabólitos secundários, incluindo fitoalexinas e ligninas. A elevação das atividades dessa enzima está vinculada a vários fatores internos e externos, como hormônios, nutrição, luminosidade, lesões ou por fatores ambientais, sendo que a regulação dessa atividade é um fator crítico na produção dos compostos secundários (AGRIOS, 2004). Em soja, Janas et al., (2000) relacionam que a redução das temperaturas, aumentaram a expressão gênica da enzima PAL, a qual é vinculada a biossíntese de lignina.

Quando é percebida a presença de um patógeno nos tecidos, as plantas induzem alterações na produção de enzimas perto do sítio de infecção, induzindo um reforço nas paredes celulares ou tentando isolar o fungo, paralisando momentaneamente o progresso da doença. Isso exige do fungo a produção de enzimas ou toxinas que degradem esses compostos para conseguir avançar a colonização, gerando gastos excessivos de energia (STANGARLIN et al., 2011). Quando ocorre a lignificação dos tecidos próximos aos ataques dos fungos, as mesmas restringem a passagem de nutrientes e água para o hospedeiro (IURKIV et al., 2006).

O ácido jasmônico é responsável por alterações genéticas nas células do xilema, estimulando dessa forma o crescimento celular. Os seus derivados possuem atuação em vários processos vegetais, inibindo crescimento e germinação de sementes, promovendo a senescência ou abscisão foliar, o amadurecimento de fruto, a formação de pigmentação nos órgãos, o enrolamento da gavinha e a formação de órgãos de reservas (RAVEN, 2014). Outra função importante do ácido jasmônico está relacionada ao seu papel nas ativações enzimáticas associadas ao sistema de lignificação das plantas. Segundo Kavalier (2000), o ácido jasmônico é um dos responsáveis na sinalização para ativação da enzima PAL.

Para ocorrer a infecção, os patógenos necessitam degradar a lignina que está presente nas células dos tecidos, exigindo a produção de enzimas e compostos específicos. Além disso, para a formação da lignina, necessita-se da expressão de alguns compostos fenólicos, chamados de substratos, que inibem a síntese de metabólitos secundários do patógeno (MELO et al., 2016). Quando ocorre o processo de

lignificação de hifas, o hospedeiro isola o patógeno, dificultando o transporte de seivas brutas e elaboradas dentro das plantas, além de dificultar a contaminação dos tecidos pelas toxinas do patógeno (LANGENBACH et al., 2016).

Considerando as informações apresentadas, o entendimento das formas com que as plantas reagem à pressão das doenças é de grande valia para o manejo efetivo das mesmas. Do mesmo modo, há relevância em buscar alternativas ao controle químico, ou produtos que possam ser utilizados de forma associada aos fungicidas, com a finalidade de diminuir a dependência desses compostos químicos, ou mesmo, aumentar a sua eficiência, tornando a agricultura mais sustentável e adequada as exigências ambientais. Dentro disso, a nutrição pode ser um caminho a seguir, tema que será abordado com maior ênfase a seguir.

2.5 Nutrição foliar e a proteção fitossanitária

Baseado na quantidade requerida, os nutrientes são divididos em macronutrientes e micronutrientes. Assim sendo, os macronutrientes são exigidos pelas as plantas em maiores quantidades e os micronutrientes sendo exigidos em menor quantidade (NUNES et al., 2011). Para completar seu ciclo e produzir descendentes a fim de manter a sobrevivência da espécie, as plantas necessitam absorver da natureza os nutrientes orgânicos [carbono (C), oxigênio (O) e o hidrogênio (H)], os macronutrientes essenciais, absorvidos em kg ha^{-1} , [nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S)] e os micronutrientes essenciais, requeridos em g ha^{-1} , [boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), zinco (Zn) e níquel (Ni)] (NUNES et al., 2011).

Diante disso, os nutrientes são classificados também conforme sua mobilidade nas folhas, sendo altamente móvel (N e K), móvel (P, S, Cl, Mg), parcialmente móvel (Ni, Mn, Mo, Zn, Fe e Cu) e imóveis (B e Ca).

A exigência nutricional das culturas, em geral, torna-se mais acentuada no início da fase reprodutiva, sendo mais crítica no período de desenvolvimento das sementes, quando uma maior quantidade de nutrientes é para elas transportada. Essa maior

requisição se deve ao fato dos nutrientes serem fundamentais à formação de novos órgãos de reserva (AZEEZ, 2015).

Sabe-se que alguns destes 17 nutrientes essenciais ao desenvolvimento da cultura da soja, têm a capacidade de promover a indução da resistência, desencadeando as defesas naturais das plantas, como a reação de hipersensibilidade, indução de proteínas relacionadas à patogênese ou a indução na síntese de lignina já mencionada acima (PES; ARENHARDT, 2015). Os micronutrientes aplicados via aplicação foliar apresentam uma resposta mais rápida na ativação dessas defesas em relação aos nutrientes aplicados via solo, uma vez que entram diretamente nos processos metabólicos (LIRA, 2018).

A fertilização foliar é, segundo a literatura, o mais efetivo modo de aplicar nutrientes em pequenas quantidades, como suplemento a adubação via sulco de semeadura, corrigindo deficiências devido à maior velocidade de absorção e conseqüentemente aumentando a qualidade e produtividade das culturas (INOCÊNCIO et al., 2012; OLIVEIRA, 2017). Além disso, podem complementar o controle das doenças, sendo uma prática já utilizada há bastante tempo.

Essa absorção de nutrientes através das folhas, é uma prática que possibilita maximizar a absorção de nutrientes pelas raízes das plantas, pelo aumento da taxa fotossintética (INOCÊNCIO et al., 2012). Frente a isso, a utilização dos nutrientes para complemento no controle das doenças é uma prática de manejo considerada relativamente fácil, tendo em vista que podemos interferir na forma e momento de aplicação (ANDRADE et al., 2015; SCHIMITH et al., 2014). Os mesmos exercem funções importantes no metabolismo vegetal, conferindo alterações na composição química da planta, mudanças na anatomia e morfologia dos tecidos, levando as plantas a diferentes níveis de resistências (POZZA & POZZA, 2012), como por exemplo, o espessamento das células da epiderme ou o maior grau de lignificação.

Porém, inúmeros fatores ambientais podem alterar a maneira em que as soluções nutritivas penetram nas folhas, modificando também a translocação desses nutrientes no espaço intracelular. Para que ocorra a penetração da solução nutritiva nas folhas e posterior absorção, a primeira barreira a ser superada é a cutícula (Figura 1). A solução

nutritiva deve atravessar a cutícula para posteriormente superar a segunda barreira, de penetrar e difundir-se no apoplasto, devendo após atravessar a plasmalema, considerada a terceira barreira, para que então atinjam o simplasto das células para serem aproveitados pelas plantas (FERNANDEZ et al., 2013).

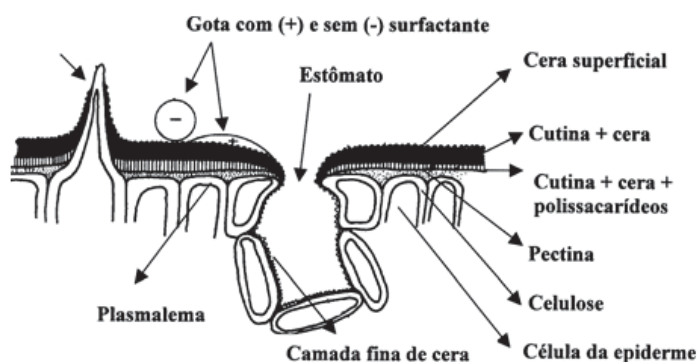


Figura 1: Representação esquemática da superfície foliar e posição das barreiras à penetração de solutos. Fonte: Fernandez et al. (2013)

A complementação da nutrição via aplicação foliar tem evidenciado ser uma alternativa no controle de algumas doenças de plantas. No manejo de doenças da cultura da soja, Balardin et al. (2006) igualmente observaram redução da severidade inicial e da taxa de progresso da FAS com o aumento nos níveis de P e K. Do exposto, os vegetais exibem várias estruturas de resistência e ou tenacidade a doenças e pragas, entre os quais, a estabilidade nutricional (deficiência ou demasia), o estágio do hospedeiro, as condições do ambiente e os atributos genéticos do vegetal são essenciais (SOARES, 2013; LIRA, 2018).

Como exemplo, podemos citar o efeito do N, um macronutriente. Quando seu suprimento é elevado, existe alta solicitação de carbono pelas plantas, o qual é oriundo da fotossíntese via ciclo de Krebs, ficando, de tal modo, sujeitada a síntese dos metabólitos secundários pelo acesso do ácido chiquímico. Esse excesso de N pode favorecer as doenças fúngicas. Já, em condições limítrofes de N ocorre o oposto, com a formação de compostos fenólicos e alcalóides (PES & AREDANHARDT, 2015).

O P também um macronutriente, está envolvido na constituição de alguns compostos biorgânicos e, em processos metabólicos, tendo sua dinâmica na resistência às doenças mutável, porém expressa resultados significativos no complemento do controle da severidade da FAS. Os fertilizantes ricos em P promovem os processos de trocas de energia e participam da constituição de estruturas nas plantas (PES & AREDANHARDT, 2015). Eles são considerados importantes na produção agrícola, pois os solos brasileiros geralmente apresentam baixa concentração desse nutriente.

O K, por sua vez, é um dos nutrientes exigidos em maiores quantidades pelas culturas. Sua principal atuação é ser ativador enzimático, nos mais diversos processos vitais da planta, e na regulação da turgidez dos tecidos, resistência ao excesso de frio, falta de água e as doenças. As requisições nutricionais da cultura da soja para P e K são, respectivamente, próximas a 38 kg ha⁻¹ de K₂O e 15 kg ha⁻¹ de P₂O, por tonelada de grãos produzidos (BARROS et al., 2008).

Os micronutrientes apresentam funções vitais no metabolismo das plantas, sendo responsáveis por processos metabólicos ou fenológicos fundamentais ao desenvolvimento da cultura, atuando principalmente como cofatores enzimáticos na estrutura celular (FANQUIN, 2005). Atuam na bioquímica e na fisiologia das plantas, induzindo a produção de compostos orgânicos, como as fitoalexinas e ligninas (ZAMBOLIM; VENTURA, 1993). Assim, utilizar a nutrição de forma correta pode ser uma alternativa no controle integrado das doenças, sendo complemento do método químico tradicional (MARSCHNER, 2012). Por antagonismo ou por competição de sítios de absorção, o excesso de um micronutriente pode inibir a absorção de outro, sendo importante manter a nutrição balanceada (MARSCHNER, 2012). Além disso, as plantas com instabilidade nutricional ficam mais suscetíveis ao ataque de patógenos do que aquelas perfeitamente nutridas. (CARVALHO, 2012).

Um dos micronutrientes essenciais e com funções importantes nas plantas é o Cu. Ele é absorvido pela planta na forma Cu²⁺, possuindo como principal papel a ativação de enzimas nos diferentes processos fisiológicos, formação da parede celular, síntese de DNA e RNA e metabolismo de proteínas. Além disso, atua na resistência das plantas às doenças (POZZA & POZZA, 2012).

Nos solos, o teor médio de Cu varia entre 10 e 80 mg kg⁻¹ e é intensamente fixado por troca de ligantes, pela matéria orgânica do mesmo. As deficiências de Cu ocorrem, sobretudo, em solos orgânicos alcalinos e em solos lixiviados de textura arenosa e sua disponibilidade diminui com o aumento do pH. Deve-se considerar que, em alguns sistemas de cultivo, são adicionadas grandes quantidades de Cu ao solo por meio de fungicidas (SOARES, 2013; LIRA, 2018).

Nas plantas, as concentrações de Cu variam entre 2 e 75 mg kg⁻¹ de matéria seca, considerando-se concentrações entre 5 e 20 mg kg⁻¹ como adequadas para o crescimento da maioria das culturas (MATSUO; FERREIRA; SEDIYAMA, 2015). A absorção do Cu pelas plantas acontece por meio de processo ativo e depende da sua concentração; apresenta forte afinidade com o átomo de N do grupo amino; é constituinte da oxidase do ácido ascórbico (vitamina C), da citocromo-oxidase e da plastocianina, que se encontram nos cloroplastos; participa do processo de enzimas de oxidorredução, com a exceção de certas amino-oxidases e galactose-oxidases, em que grande parte das enzimas com Cu reagem com O₂ e o reduzem a H₂O₂ ou H₂O (MATSUO; FERREIRA; SEDIYAMA, 2015). O Cu também faz parte da enzima fenol-oxidase, que catalisa a oxidação de compostos fenólicos a cetonas durante a formação da lignina e da cutícula. Além disso, o Cu influencia a fixação do N₂ pelas leguminosas, sendo essencial no balanço de nutrientes que regulam a transpiração na planta.

Alguns fatores influenciam a absorção do Cu pelas folhas, entre eles, as fontes e sua solubilidade, as doses aplicadas e o tamanho da partícula. Em relação às fontes de micronutrientes, existem três grandes grupos: fontes inorgânicas, quelatos sintéticos e óxidos silicatados. Cada fonte tem suas particularidades, o que pode refletir na aplicação e no aproveitamento delas pelas plantas. A solubilidade em água e o tamanho da partícula dessas fontes é um dos fatores mais importantes para a eficiência desses produtos, especialmente para aplicações localizadas.

As fontes inorgânicas de Cu compreendem os sais metálicos (sulfatos, cloretos e nitratos) os quais possuem alta solubilidade em água e os óxidos, carbonatos e fosfatos insolúveis ou parcialmente solúveis em água. As fontes de Cu nutricional de liberação gradual proporcionam maior efeito, pois mantêm suprimento constante do nutriente no

tecido foliar, beneficiando sua absorção (POZZA; POZZA, 2012). Nesse caso é necessário observar a velocidade de absorção do elemento via adubação foliar, a qual também é influenciada pelos íons acompanhantes e pela forma que o elemento se encontra na solução (LIRA, 2018). Além disso, folhas novas absorvem mais que as velhas, as condições ambientais como pH próximo da neutralidade e o modo de aplicação, com gotas finíssima, interferem na eficiência da aplicação foliar (LIRA, 2018). Neste contexto, a reposição de micronutrientes nas folhas, por solução ou suspensão na parte aérea da planta, promoverá em plantas melhor nutridas, bem como, poderá refletir na produção da cultura e complementar a adubação no solo (MELO et al., 2016).

Além do Cu, o silício (Si), (considerado um elemento benéfico) que é um dos componentes majoritários de minerais do grupo dos silicatos, na forma insolúvel, tem papel de destaque na prevenção da incidência de pragas e doenças nas plantas, menor suscetibilidade ao acamamento e manutenção das folhas eretas. A principal fonte natural de Si é o feldspato que, ao sofrer o processo de intemperização, libera o ácido silícico (H_4SiO_4), que é a principal forma de absorção do silício pelas plantas (MENDES et al., 2011).

Os mecanismos pelos quais o Si atua na resistência das plantas a patógenos ainda não estão totalmente esclarecidos. A proposição da formação de uma barreira física abaixo da cutícula após a polimerização do ácido monossilícico explica, em parte, o acréscimo da resistência de algumas espécies de plantas a certos patógenos quando supridas com Si. Além disso, o incremento na atividade de enzimas líticas à parede celular fúngica ou associadas com o metabolismo secundário da planta pode potencializar esse mecanismo de defesa e, não age exclusivamente de forma passiva na resistência (MENDES et al., 2011).

Na soja, o Si pode influenciar a produção vegetal através de diferentes ações indiretas, como o melhoramento na estrutura das plantas (folhas mais eretas), e assim abrandar o auto-sombreamento e diminuir o acamamento. O Si aumenta a rigidez estrutural dos tecidos e atenua a fitotoxidez de Fe, Al, Mn e Na. Com o aumento da

rigidez fornecido pelo Si na parede celular, ao mesmo tempo ocorre uma limitação na incidência de insetos e patógeno (RODRIGUES et al., 2011).

Um estudo realizado em 35 culturas mostrou que existem inúmeros casos de deficiência tanto de macro como de micronutrientes. Foi observada falta de B em 24 culturas, Zn em 23, Mo e Cu em 7 e Mn em 6 culturas (FAVARIN; MARINI, 2000). Essa correção poderia ser feita através da fertilização foliar, que se baseia nos fundamentos científicos de que folhas vegetais possuem a capacidade de absorção de nutrientes, principalmente após o estágio reprodutivo. Neste estágio fenológico, (onde a demanda por nutrientes é maior pela translocação dos mesmos para os legumes e a absorção pelas raízes é diminuída) é possível corrigir as deficiências por meio dessas aplicações foliares (SCHREINER, 2010).

Portanto, os elementos minerais estão intrincados em todos os níveis de defesa do vegetal, sejam como segmentos incondicionais ou ativadores, inibidores ou os reguladores do metabolismo. Frente a isso, o conhecimento da função, composição e origem dos elementos minerais, o momento adequado de suprimento e as doses a serem utilizadas nas plantas são premissas básicas, para que depois seja possível ponderar sobre o seu desempenho na resistência a certo patógeno, lembrando que o equilíbrio nutricional é determinante para a obtenção de máximas produtividades (GATIBONI, 2015).

2.5.1 Cobre

O Cu foi identificado como nutriente pela primeira vez na década de 1930, sendo ele o 25º elemento mais abundante na crosta terrestre e a sua solubilidade é muito dependente do pH do solo, tornando-se prontamente disponível a um pH do solo abaixo de 6,0 (BRAVIN et al., 2012). Esse elemento é absorvido preferencialmente por difusão, na forma Cu^{2+} e Cu-quelato e a concentração nos tecidos das plantas é baixa, de 5 a 20 mg kg^{-1} de matéria seca, dependendo das espécies cultivadas (MANTOVI et al., 2003). É absorvido pelas plantas por processo ativo, com gasto energético e a sua movimentação nos tecidos fica regrada pelas concentrações do mesmo, sendo móvel das

folhas velhas para as novas e para órgãos reprodutivos, em plantas bem supridas (YRUELA, 2005).

Atuando em vários processos fisiológicos das plantas, o Cu age na fotossíntese, respiração, metabolismo de proteínas e em rotas metabólicas de produção de compostos de resistência contra patógenos, principalmente na síntese de lignina (TAIZ; ZEIGER, 2017). A função deste micronutriente está envolvida na formação de compostos fenólicos pelas plantas (Figura 2), que atuando como defesa natural impede a penetração de organismos nos tecidos vegetais, consequentemente aumentando a resistência à infecção foliar (KUMAR et al., 2017).

A alta concentração de Cu reduz as atividades das enzimas peroxidase e catalase, provocando aumento da respiração dos tecidos infectados, acumulando peróxido, que é uma substância altamente bactericida (ZAMBOLIM; VENTURA, 1993). Pelo fato dos patógenos necessitarem de menores concentrações de Cu para sobreviver, dependendo da dose utilizada, o Cu atua naturalmente como fungicida e bactericida (CARVALHO; CUNHA; SILVA, 2012).

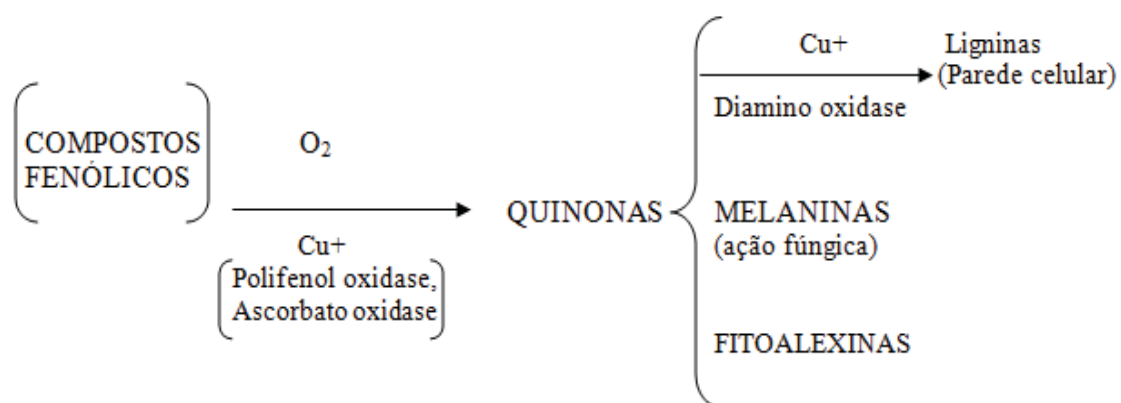


Figura 2: Atuação do cobre na transformação de compostos fenólicos. Fonte: Adaptado de Kirkby e Romheld (2007)

Apesar de requerido em pequenas quantidades pela cultura da soja, o Cu é essencial para completar o ciclo vegetativo. A sua carência pode balizar o crescimento e a produção das plantas, mesmo quando todos os outros nutrientes se façam presentes em quantidades adequadas. Este micronutriente age em múltiplos processos fisiológicos, especialmente em rotas metabólicas de produção de resistência contra patógenos,

podendo atuar também como fungicida (KUMAR et al., 2017). O sintoma característico de deficiência de Cu é o amarelecimento das folhas, com as extremidades esbranquiçadas (MALAVOLTA, 2006). Na deficiência, as plantas reduzem o metabolismo dos fenóis, que são precursores da lignina, deixando as plantas mais suscetíveis às doenças (MARSCHNER, 2012).

Igualmente, a deficiência de Cu se deve a baixas concentrações no solo, elevado pH, excesso de matéria orgânica ou de N, P e Zn nas adubações, ou mesmo, pela ausência de aeração adequada no solo, formando compostos de Cu insolúveis em água (AZEEZ, 2015). Relevante se faz mencionar que o Cu possui menor mobilidade no solo, por apresentar ligações físico-químicas, cuja labilidade é condicionada ao ligante, com evidência para matéria orgânica e óxidos, além da condição geoquímica, de maneira especial pH, formando complexos estáveis (MELO et al., 2016).

Dependendo da sua funcionalidade, deve se analisar a fonte utilizada, tendo em vista que ocorrem diferenças de absorção. A fonte de sulfato de Cu, por exemplo é significativamente mais absorvido em comparação a óxidos e carbonatos, por ser solúvel em água. Mas essa solubilidade maior pode ocasionar reflexos negativos, como a fitotoxicidade pelo excesso de absorção. Os óxidos têm um custo de produção menor, por ser uma fonte mais fácil de ser encontrada e manipulada, porém pela baixa solubilidade, necessita de processos de transformação da matéria prima, tornando-a nano particulada. Já os carbonatos, independente da fabricação, são parcialmente solúveis em meio ácido (KUMAR et al., 2017).

Assim, as disponibilidades de produtos comerciais contendo micronutrientes vêm crescendo ano após ano, porém as informações sobre a eficiência dessas aplicações foliares são divergentes e ainda escassas na área da fisiologia vegetal, havendo necessidade de maiores estudos sobre a sua viabilidade.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Sujeito da pesquisa

O experimento foi conduzido no campo experimental da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo (FAMV/UPF), localizado no município de Passo Fundo – Rio Grande do Sul. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico húmico (STRECK et al., 2008), situado na altitude de 687 metros, latitude 28° 23' S e longitude 52° 38' W.

O clima é do tipo fundamental úmido, conforme classificação de Köppen. Devido à região apresentar clima subtropical úmido, há ocorrência de chuvas em todos os meses do ano, sendo que as normais climatológicas, de 1961 a 1990 de: precipitação anual média acumulada de 1.803 mm; temperatura mínima de 13,2 °C; temperatura máxima de 23,6 °C; temperatura média de 17,7 °C (EMBRAPA, 2017).

Anteriormente a semeadura, foi retirada amostragens de solo estratificadas em duas profundidades, de 0-10 cm e de 10-20 cm, a fim de caracterizar os atributos químicos do solo da área experimental (TEDESCO et al., 1995). As características encontradas constam na tabela 1.

Tabela 1 – Atributos físicos e químicos do solo da área experimental. Passo Fundo, RS, 2016

| | Arg | pH | IND. | P | K | M.O | Al | Ca | Mg | H+Al | CTC | Saturação (%) | | |
|--------|-----|------------------|------|-------------------------|-----------------|-----|--|--|--|--|--|---------------|------|-----|
| Camada | % | H ₂ O | SMP | ..mg dm ³ .. | dm ³ | % |cmol _c dm ³ |cmol _c dm ³ |cmol _c dm ³ |cmol _c dm ³ |cmol _c dm ³ | Bases | Al | K |
| 0-10 | 40 | 4,9 | 5,3 | 29,2 | 224 | 2,7 | 1,0 | 4,4 | 2,0 | 9,7 | 16,84 | 42,1 | 12,8 | 3,4 |
| 10-20 | 50 | 4,8 | 5,26 | 22,4 | 170 | 1,9 | 1,4 | 4,1 | 2,1 | 10,2 | 16,91 | 39,7 | 17,2 | 2,5 |

Fonte: dados da pesquisa (2018).

Tabela 1.1 - Teores de macronutrientes e micronutrientes do solo da área experimental. Passo Fundo, RS, 2016

| | Argila | pH | S | B | Cu | Zn | Mn |
|--------|--------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Camada | % | H ₂ O |mg/dm ³ |mg/dm ³ |mg/dm ³ |mg/dm ³ |mg/dm ³ |
| 0-10 | 40 | 4,9 | 3,2 | 0,38 | 2,86 | 4,61 | 37,8 |
| 10-20 | 50 | 4,8 | 5,7 | 0,63 | 1,83 | 1,00 | 14,1 |

Fonte: dados da pesquisa (2018).

3.2 Tratamentos e delineamento experimental

Utilizou-se o delineamento em blocos casualizados (DBC) com quatro repetições. Cada parcela experimental foi composta por seis linhas de semeadura, com cinco metros de comprimento, com espaçamento entre as linhas de cultivo de 0,50 m. A primeira e a sexta linha de semeadura de cada parcela serviram de bordaduras do experimento, totalizando assim 10 m² de área útil.

A segunda, terceira e a quarta linhas de semeadura foram utilizadas para a avaliação dos componentes de rendimento de grãos. A quinta linha de semeadura foi utilizada para as avaliações da severidade da FAS, estratificação dos componentes do rendimento das plantas e coleta do material vegetal para análise do Cu e da lignina foliar.

Para o trabalho, foram utilizados dois produtos comerciais, de fontes distintas: óxido cuproso – (Cu₂O) e carbonato de cobre – (CuCO₃). Nove tratamentos foram avaliados: Tratamento 1 - testemunha, sem aplicação de Cu foliar; Tratamento 2 - aplicação de 30 g ha⁻¹ Cu (óxido cuproso); Tratamento 3 - aplicação de 60 g ha⁻¹ Cu (óxido cuproso); Tratamento 4 - aplicação de 90 g ha⁻¹ de Cu (óxido cuproso); Tratamento 5 - aplicação de 120 g ha⁻¹ de Cu (óxido cuproso); Tratamento 6 - aplicação de 30 g ha⁻¹ de Cu (Carbonato de Cu); Tratamento 7 - aplicação de 60 g ha⁻¹ de Cu (Carbonato de Cu); Tratamento 8 - aplicação de 90 g ha⁻¹ de Cu (Carbonato de Cu); Tratamento 9 - aplicação de 120 g ha⁻¹ de Cu (Carbonato de Cu).

3.3 Procedimentos experimentais

O experimento foi implantado no dia seis de dezembro de 2016, em área naturalmente infestada por *Phakopsora pachyrhizi*, sob sistema plantio direto, em áreas com restos culturais de aveia preta. Para a execução do experimento, foi utilizada a cultivar de soja Brasmax Ativa RR, do grupo de maturação 5.6, porte baixo, hábito de crescimento determinado e altamente suscetível a doenças, seguindo as recomendações do obtentor para implantação da mesma. No manejo de plantas daninhas em dessecação,

foi utilizado o herbicida glifosato (720 g kg^{-1} i.a.) na dose de $1,5 \text{ kg}^{-1}$ + saflufenacil (700 g kg^{-1} i.a.) na dose de $0,08 \text{ kg ha}^{-1}$.

As sementes utilizadas foram adquiridas com tratamento industrial, composta pelos inseticidas imidacloprido (150 g L^{-1} i.a.) + tiodicarbe (450 g L^{-1} i.a.). Foi utilizada a adubação de $6,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 60 kg ha^{-1} de K_2O no sulco de semeadura. Trinta dias após a germinação e emergência das plantas de soja procedeu-se o controle químico das plantas daninhas, pulverizando o herbicida glifosato (720 g kg^{-1} i.a.) na dose de $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$.

Para determinação da primeira aplicação, observou-se o estágio fenológico da cultura, as condições climáticas e a ocorrência do primeiro foco de FAS no município de Passo Fundo - Rio Grande do Sul, que ocorreu no dia 04/01/2017 (CONSÓRCIO ANTI-FERRUGEM, 2017).

Foram realizadas quatro aplicações das caldas fitossanitárias associadas aos tratamentos de Cu, sendo diluídos em água e aplicados na cultura, exceto na testemunha que não recebeu os tratamentos com Cu (Tabela 2). Utilizou-se um pulverizador costal pressurizado com CO_2 , acoplado a uma barra de aplicação munida com quatro pontas, espaçadas a $0,50 \text{ m}$. As pontas empregadas foram Teejet[®] TT110015, com pressão de serviço constante regulado para um volume de calda de 150 L ha^{-1} . No momento das aplicações, respeitaram-se as condições ideais de umidade relativa do ar, velocidade do vento e de temperatura, para que essas não viessem a interferir no resultado do estudo.

Nas respectivas pulverizações, as plantas encontravam-se nos estágios fenológicos de V7 (sexta folha trifoliolada aberta), V9 (oitava folha trifoliolada aberta), R2 (florescimento pleno) e R6 (legumes com enchimento pleno) (FEHR; CAVINESS, 1977).

No estágio fenológico de R6, após a quarta aplicação, foi realizada a coleta do material para a análise da lignina foliar, análise de micronutrientes foliar, a contagem do número de plantas por metro linear e a determinação da população final de plantas.

Tabela 2 - Caldas fitossanitárias associadas aos tratamentos com cobre. Passo Fundo, RS, 2017

| Caldas Fitossanitárias | | | | | | Data | Estádio |
|------------------------|-----------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------|
| | | | | | | Aplicação | Fenológico |
| A ¹ | Fungicida | Dose (L ha ⁻¹) | Inseticida | Dose (L ha ⁻¹) | Óleo | Dose (L ha ⁻¹) | |
| 1 ^a | Orkestra [®] | 0,35 | Nomolt [®] Connect [®] | 0,25 1,0 | Assist [®] | 0,50 | 21/01/17 V7 |
| 2 ^a | Fox [®] | 0,40 | Nomolt [®] Connect [®] | 0,25 1,0 | Áureo [®] | 0,25 | 04/02/17 V9 |
| 3 ^a | Ativum [®] | 1,0 | Nomolt [®] Fastac Duo [®] | 0,25 0,35 | Assist [®] | 0,50 | 18/02/17 R2 |
| 4 ^a | Fox [®] | 0,40 | Pirate [®] Perito [®] | 1,0 1,0 | Áureo [®] | 0,25 | 15/03/17 R6 |

A¹: Aplicações

®: Marca registrada

Estádio fenológico: Ferhr e Cavines (1977) – (Apêndice II)

3.4 Caracterização do potencial hidrogeniônico (pH) e da condutividade elétrica (CE) das caldas fitossanitárias

Depois de homogeneizada a calda fitossanitária, foi retirada uma alíquota da mesma a fim de estabelecer critérios relacionados principalmente a fitotoxicidade foliar do Cu. As amostras foram coletadas manualmente e armazenadas em frascos plásticos com capacidade de 600 mL. Os frascos foram abertos somente no local de coleta, preenchidos por completo e tampados. Logo após as coletas, as amostras foram encaminhadas ao laboratório para a análise das características química e física.

No experimento executado, a calda fitossanitária ficou dentro dos parâmetros ideais para o funcionamento da maioria dos produtos químicos (fungicidas e inseticidas), o qual varia de 5 a 7. De maneira geral, com a elevação das doses de Cu nas caldas fitossanitárias, ocorreu uma elevação do pH, para ambas as fontes, variando de 5,21 até 8,02 (Apêndice III). Nenhum tratamento reduziu o pH da solução abaixo de 5,0 e apenas o tratamento 9, na primeira aplicação, ultrapassou o pH 8,0. Os demais tratamentos ficaram na faixa de 5,2 a 7,6. Não foi verificada incompatibilidade entre os produtos durante a diluição dos compostos em água, não havendo efeitos indesejáveis, como precipitação e/ou engrossamento de calda. Também não foi observada fitotoxicidade visual nas folhas de soja, para ambas as fontes.

O pH é a concentração de íons de hidrogênio existentes numa solução e define o grau de alcalinidade ou acidez da mesma, variando numa escala de 0 a 14, tendo em 7,0 a neutralidade, na qual encontra-se a água pura (MADALOSSO et al., 2017). Para fungicidas e inseticidas, existe uma faixa de pH onde a maioria dos compostos têm sua eficiência elevada no controle de fungos e pragas, variando de 5,0 a 7,0 (GODOY et al., 2017). Para herbicidas, é comum a utilização de glifosato em sojas resistentes a esse composto, sendo este relacionado à imobilização de nutrientes no solo e nas plantas, favorecendo o aparecimento de doenças (BÖHM; ROMBALDI, 2010). No Brasil e nos Estados Unidos as frequentes aplicações de glifosato induziram a deficiência de Fe, Zn e Mn em plantas resistentes a este herbicida (HUBER, 2006), sendo que essa deficiência pode ser observada também na interação com o solo (EKER et al., 2006).

A molécula do glifosato resulta em diferentes cargas iônicas em função do pH do meio. Sob pH ácido, estas cargas conferem ao glifosato forte característica quelante de metais (COUTINHO; MAZO, 2005), podendo ocasionar a imobilização deles no solo e nas plantas (EKER et al., 2006). O resultado é um amarelecimento das folhas, originando o sintoma denominado de “yellow flashing” (ZOBIOLE et al., 2010) que é uma consequência direta da imobilização de Fe e Mn. A duração do sintoma depende da habilidade das plantas em repor esses nutrientes para os níveis adequados, podendo ser via absorção radicular ou foliar (EKER et al., 2006).

Porém, ainda não foi comprovada a significância desse efeito no metabolismo e rendimento de grãos da cultura, não permitindo a completa afirmação desses resultados. Tendo em vista que esse processo varia conforme inúmeros fatores, como a formulação e a dose do glifosato, cultivar implantada e as condições ambientais presentes na aplicação (ZOBIOLE et al., 2010). Cunha e Alves (2009) alertam que altas concentrações de íons de hidrogênio podem reagir com o ingrediente ativo, diminuindo a concentração deste na calda e afetando seu funcionamento. Também podem ocorrer alterações na estabilidade física dos produtos quando os mesmos passarem por bruscas mudanças de pH (GODOY et al., 2017). O alto pH da água acelera a degradação dos produtos químicos, alterando a sua absorção pelos tecidos vegetais (CUNHA; ALVES, 2009).

A utilização de nutrientes via aplicação foliar está se tornando corriqueira, visando complementar a adubação do solo, demonstrando em alguns casos efeitos positivos nas produtividades (REZENDE, 2005). Sabe-se que nem todas as misturas acarretam alterações benéficas para as caldas, podendo gerar incompatibilidades de caldas ou efeitos antagônicos de controle (ZANATTA et al., 2007). Em um trabalho realizado com Cu foliar, os autores relataram presença de fitotoxicidade visual ao utilizar sulfato de Cu, para controlar *Erwinia psidii* na cultura da goiabeira, atribuindo esse efeito à alta solubilidade da fonte de Cu utilizada (GODOY et al., 2017).

Para o parâmetro físico condutividade elétrica (CE), a elevação das doses de Cu proporcionou a elevação das CE, para ambas as fontes, variando de 111,5 até 483,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Apêndice IV). Valores elevados de CE indicam a presença de íons livres na solução, podendo esses ligar-se as moléculas químicas, fazendo com que o produto perca seus efeitos fungitóxicos ou no controle de doenças (RHEINHEIMER; SOUZA, 2000). A variação de CE encontradas nas quatro pulverizações deve-se aos diferentes compostos químicos utilizados, corroborando com o trabalho realizado por Cunha et al. (2017).

Ressalta-se que a CE pode influenciar a eficácia de alguns produtos, tendo em concentrações acima de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, características corrosivas a calda (RHEINHEIMER; SOUZA, 2000). No experimento, os tratamentos não apresentaram alterações de eficácia dos produtos. Nota-se que na terceira aplicação foi onde encontramos os maiores valores de CE, para ambas as fontes, sendo essa variação dependente dos demais compostos químicos utilizados na calda fitossanitária e não ao Cu (Apêndice IV).

As amostras foram caracterizadas quanto ao parâmetro físico de condutividade elétrica (CE) e o parâmetro químico pH (potencial hidrogeniônico). O pH e a CE foram medidos diretamente nas soluções utilizando-se peagâmetro e condutivímetro portáteis (Marca/Modelo Hanna HI98139). Anteriormente à realização das leituras, os equipamentos foram calibrados por meio de soluções-padrão fornecidas pelo fabricante.

3.5 Avaliação da severidade da ferrugem-asiática

A severidade (porcentagem da área foliar com sintomas da doença) foi avaliada por meio de notas visuais com auxílio de escala diagramática (GODOY et al., 2006) (Anexo I). As avaliações foram realizadas aos 75, 103 e 113 dias após a semeadura (DAS), coletando-se seis trifólios aleatórios, na linha de avaliação de cada parcela (dois do terço inferior, dois do terço médio e dois do terço superior da planta).

A área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD) é uma variável que explica o progresso de uma doença, resumindo os dados ao longo do ciclo e em um único dado (proporção da doença *versus* o tempo), o que permite uma melhor compreensão dos dados, tendo em vista a possibilidade de verificar as tendências de desempenho de todos os tratamentos estudados.

AACPD foi determinada pela fórmula: $AACPD = \Sigma [(y_1 + y_2) / 2] * (t_2 - t_1) / D$, onde y_1 e y_2 são duas avaliações consecutivas realizadas nos tempos t_1 e t_2 , respectivamente e, D é o número de dias do ciclo da cultivar (AACPD) (CAMPBELL; MADDEN, 1990). A porcentagem de controle da doença foi calculada através da fórmula proposta por Aboott (1925) em que: $(PC \%) = (T - t) * 100 / T$, sendo que T é a severidade da testemunha e t é a severidade encontrada no tratamento (ALFARO; TROJAN, 2018).

3.6 Caracterização dos componentes do rendimento de grão e da produtividade

No estágio fenológico R6, foram coletadas 10 plantas na sequência da linha de cada parcela para avaliar os componentes do rendimento através de estratificações das plantas. Foi determinado o número de legumes (NL) por planta (n° pl) e o número de grãos (NG) por planta (n° pl).

As colheitas das parcelas foram realizadas no dia 14 de abril de 2017 aos 129 DAS, quando as plantas se encontravam no estágio R9 (95% dos legumes com a cor da vagem madura) (FEHR; CAVINESS, 1977). A mesma foi realizada através de uma colhedora de parcelas (Marca/Modelo Wintersteiger Classic ST) colhendo as três linhas

centrais das parcelas, totalizando 7,5 m² de área útil. As amostras foram pesadas, corrigidas para a umidade de 13% e determinada a massa de mil grãos (MMG) e o rendimento de grãos (RG) (kg ha⁻¹).

3.7 Análise de micronutrientes em grãos e folhas de soja

No estágio fenológico R.6, foram coletados seis trifólios aleatórios, na linha de avaliação de cada parcela (dois do terço inferior, dois do terço médio e dois do terço superior da planta), para analisar os micronutrientes foliares. Foram excluídos os pecíolos, deixando somente o limbo foliar, o qual foi lavado em água destilada e posteriormente secado na estufa de secagem por dois dias a temperatura de 50 °C.

Para as análises de micronutrientes em grãos, após a colheita, uma amostra de 100g de grãos de soja foi coletada de cada parcela de avaliação. As mesmas foram armazenadas separadamente e levadas à estufa para a secagem, até estabilizarem na umidade de 13%. Após a secagem, os grãos foram triturados e armazenados em tubos vedados, os quais foram encaminhados para o Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária (FAMV) da Universidade de Passo Fundo.

Foi realizada a digestão em ácido nítrico perclória dos materiais vegetais (folhas e grãos) e posteriormente feita às determinações dos teores de Fe, Zn, Mn e Cu por meio da espectrofotometria de absorção atômica. Todas as análises seguiram a metodologia descrita por Malavolta et al. (1997).

3.8 Análise de lignina foliar

No estágio fenológico R.6, coletou-se seis trifólios aleatórios na linha de avaliação de cada parcela (dois do terço inferior, dois do terço médio e dois do terço superior das plantas). Posteriormente os terços foram misturados e lavados em água destilada e secadas na estufa de secagem por dois dias a temperatura de 50 °C.

Posteriormente, as amostras foram moídas e aclimatadas em tubos devidamente vedados e encaminhadas ao Centro de Pesquisa em Alimentação (CEPA) da

Universidade de Passo Fundo, onde foram avaliados os teores de lignina através da metodologia descrita no Sindirações (Compêndio Brasileiro de Alimentação Animal, 2017).

3.9 Análise estatística

Os dados de severidade da FAS, micronutrientes em folhas e grãos, teores de lignina foliar, análise dos componentes do rendimento e produtividade, foram igualmente submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste Scott Knott a 5% de probabilidade de erro, utilizando o software Sisvar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Severidade da ferrugem-asiática da soja

A AACPD da FAS foi alterada pela aplicação foliar do Cu juntamente com as caldas fitossanitárias ($p > 0,05$). Os tratamentos 3, 4, 5, 6, 7, 8, e 9 retardaram o progresso da doença, diferindo-se estatisticamente do tratamento 2 e da testemunha ($p > 0,05$) (Tabela 3).

Tabela 3 - Área abaixo da curva de progresso da severidade da ferrugem-asiática da soja (AACPD) e porcentagem de controle em relação à testemunha, em função dos tratamentos com cobre (Cu) foliar. Passo Fundo, RS, 2017

| Tratamentos | AACPD total Ferrugem-asiática | C (%) |
|--|----------------------------------|-------|
| 1 Testemunha | 310,45 c | 0 |
| 2 30 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 253,37 b | 23 |
| 3 60 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 215,71 a | 44 |
| 4 90 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 232,44 a | 34 |
| 5 120 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 195,56 a | 59 |
| 6 30 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 190,13 a | 63 |
| 7 60 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 179,85 a | 73 |
| 8 90 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 187,64 a | 65 |
| 9 120 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 182,08 a | 71 |
| C.V. (%): | 14,05 | 14,05 |

Médias seguidas de diferentes letras nas colunas diferem entre tratamentos, conforme o Teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$); C.V. (%): coeficiente de variação;

A cultura da soja foi semeada no final da época recomendada para a cultivar, para que a mesma ficasse exposta a uma maior severidade da doença no campo experimental. No entanto, na safra de 2015/16 houve um inverno rigoroso que eliminou plantas voluntárias de soja e plantas hospedeiras da doença, sendo que o primeiro foco da doença no estado ocorreu somente em 04/01/2017 (CONSÓRCIO ANTI-FERRUGEM, 2017). Isso sugere uma baixa quantidade inicial de inóculo no campo, mesmo com condições ambientais favoráveis. Observando no ano safra anterior (2015/16), o primeiro foco de doença encontrado no município de Passo Fundo foi no dia 13/12/2015, vinte e um dias antes (CONSÓRCIO ANTI-FERRUGEM, 2017).

A FAS pode infectar a cultura a partir dos estádios iniciais de desenvolvimento, desde que encontre condições ambientais favoráveis (ALVES, 2016). As temperaturas durante a condução do experimento ficaram dentro das médias normais para esse período do ano, oscilando entre 15 e 26 °C (Apêndice I), mantendo-se também dentro do intervalo favorável ao desenvolvimento do patógeno, que é de 15 a 28 °C. Já a precipitação pluvial acumulada durante a condução do experimento, dos meses de dezembro a abril, atingiu 867,3 mm. A normal histórica para este mesmo período é de 623,6 mm, tendo acumulado assim 243,7 mm a mais que a normal histórica para o município. Esses períodos contínuos de molhamento foliar de 6 a 12 horas auxiliam na infecção e expansão do inóculo na cultura, exercendo um efeito direto na dispersão do patógeno dentro do dossel da cultura (DEL PONTE; ESKER, 2008).

As baixas quantidades iniciais do inóculo, a utilização de fungicidas apropriados e o respeito aos intervalos de aplicação, não permitiram uma maior pressão da doença ao longo do ciclo da cultura mesmo com condições climáticas ideais. A resistência genética, as práticas de manejo e o controle químico aliados ao efeito específico dos nutrientes colaboram para a diminuição da agressividade das doenças (HUBER, 2002).

Mesmo nessas condições, a aplicação foliar de Cu, juntamente com as caldas fitossanitárias foi capaz de retardar a evolução da severidade da FAS, variado o controle de 23% a 73% na AACPD dos tratamentos em relação à testemunha (Tabela 3). Ambas as fontes de Cu foram eficientes na diminuição da severidade da FAS, porém o tratamento 7 (60 g ha⁻¹ de Cu (Carbonato de Cu) se destacou, apresentando a menor AACPD (179,85), obtendo 73% de retardo da doença em relação à testemunha.

Na cultura da soja, o Cu tem efeito tanto nutricional, como na sanidade das plantas, através do crescimento secundário como síntese de lignina e produção de fitoalexinas, que são substâncias do sistema de defesa. A resposta da soja a severidade da FAS com essas variações de doses de Cu, é tanto para a lignificação dos tecidos como para a indução de resistência.

Nota-se que para a fonte de Carbonato de Cu, a severidade da FAS foi menor em relação à fonte de óxido cuproso, permitindo a planta vegetar por um período maior.

Ocorreu também a diminuição da severidade da FAS em função do aumento das doses, para ambas as fontes. Esses dados são justificados pela participação do Cu nos componentes do metabolismo de carboidratos, na síntese de lignina e de clorofila (GODOY et al., 2017; ALFARO; TROJAN, 2018).

Corroborando esse estudo, na cultura do feijão, observou-se um decréscimo de linear de 35% da área abaixo da curva de progresso da severidade da antracnose, com o aumento das doses de Cu, sendo que na maior dose (78 mg L⁻¹ Cu), ocorreu a menor AACPD (MORAES, 2009). Segundo os autores, essas doses de Cu, aplicadas via foliar são muito baixas para terem efeitos fungitóxicos diretos através do contato com o patógeno.

Em arroz, La Parte et al., (2014) verificaram uma menor incidência, severidade e intensidade do mal-do-pé (*Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*), utilizando doses de 60 mg L⁻¹ Cu. Em pepino, ocorreu uma proteção das plantas após a aplicação foliar de H₃BO₃, CuSO₄, MnCl₂ ou KMnO₄, reduzindo a severidade do mofo pulverulento (REUVENI et al., 1997). Em pimentão, Aguiar (2003) verificou que os tratamentos com óxido cuproso foram eficientes em reduzir a população da bactéria *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria*.

O fornecimento dos nutrientes às plantas deve ser facilitado através de práticas de manejo que possibilitem a maior absorção pelas plantas, sendo imprescindível conhecer também a fonte dos nutrientes (POZZA; POZZA, 2003). Outro aspecto a ser considerado na adubação com Cu refere-se à quantidade de nutriente a qual a planta é exposta e a forma que esse elemento é disponibilizado. Boschiero (2017) afirma que há uma redução na biomassa, no conteúdo de clorofila e na atividade do oxigênio nos tilacóides quando esse micronutriente é absorvido pelas raízes, em meio hidropônico. Entretanto quando a absorção ocorreu via foliar, o Cu promoveu aumento no conteúdo de clorofila e estímulo na atividade fotossintética de plantas de soja.

4.2 Componentes do rendimento e produtividade de grãos

O número de legumes por planta, número de grãos por legume e massa de mil grãos não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$). Já para a produtividade de grãos, o tratamento 5 (120 g ha^{-1} de Óxido cuproso) e o tratamento 7 (60 g ha^{-1} Cu (Carbonato de Cu) apresentaram os melhores resultados, diferindo-se estatisticamente dos demais tratamentos (Tabela 4).

Tabela 4 – Componentes do rendimento e produtividade da soja sob diferentes doses e fontes de cobre (Cu) aplicado via foliar. Passo Fundo, RS, 2017

| Tratamentos | ¹ NLP | ² NGP | ³ MMG (g) | Prod. (kg ha^{-1}) | RP (%) |
|---|------------------|------------------|----------------------|-------------------------------|--------|
| 1 Testemunha | 35 ns | 90 ns | 155,9 ns | 4275,08 b | 0 |
| 2 30 g ha^{-1} de Cu - (Óxido cuproso) | 38 | 98 | 164,5 | 4615,09 b | 7 |
| 3 60 g ha^{-1} de Cu - (Óxido cuproso) | 38 | 93 | 167,1 | 4503,79 b | 5 |
| 4 90 g ha^{-1} de Cu - (Óxido cuproso) | 40 | 105 | 163,9 | 4520,37 b | 5 |
| 5 120 g ha^{-1} de Cu - (Óxido cuproso) | 39 | 102 | 168,2 | 4815,55 a | 11 |
| 6 30 g ha^{-1} de Cu - (Carbonato de Cu) | 38 | 99 | 166,4 | 4381,06 b | 2 |
| 7 60 g ha^{-1} de Cu - (Carbonato de Cu) | 37 | 94 | 167,3 | 4896,64 a | 13 |
| 8 90 g ha^{-1} de Cu - (Carbonato de Cu) | 39 | 103 | 169,4 | 4595,04 b | 7 |
| 9 120 g ha^{-1} de Cu - (Carbonato de Cu) | 40 | 102 | 166,8 | 4461,97 b | 4 |
| C.V. (%) | 13,3 | 15,1 | 3,9 | 5,1 | 5,1 |

Médias seguidas de diferentes letras nas colunas diferem entre tratamentos, conforme o Teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$); ns - não significativo; C.V. (%): coeficiente de variação; NLP: número de legumes por planta; NGP: número de grãos por planta; MMG: massa de mil grãos. Prod: Produtividade; RP; Porcentagem de aumento de produtividade em relação ao tratamento menos produtivo.

O componente de rendimento, número de legumes por planta é a variável que pode apresentar a maior variabilidade, podendo ser influenciada pela nutrição mineral. Este componente é basicamente formado pelas flores que a planta consegue manter ativas e que posteriormente irão formar os grãos (THOMAS; COSTA, 2010). Fageria et al. (2014) verificaram aumento no número de legumes por planta de forma significativa com a utilização de doses de sulfato de Cu. Neste trabalho, não foram observadas diferenças estatísticas em relação a este componente do rendimento.

Thomas e Costa (2010) sugerem também que o número de grãos por legume é o que apresenta menor variação dentre os componentes do rendimento, demonstrando

uma uniformidade do melhoramento genético na busca de plantas com produção média de dois grãos por legume, determinando-se então uma característica genética. Neste trabalho, foi verificada uma tendência de aumento do número de legumes por planta e do número de grãos por planta com a elevação das doses de Cu juntamente com as caldas fitossanitárias, no entanto essas variações não diferiram estatisticamente da testemunha.

Já a massa de grão é um componente do rendimento característico de cada cultivar, o qual fortemente gerenciado pela genética da mesma e em alguns casos, pelas condições ambientais onde as plantas estão localizadas. Esse valor representa o tamanho específico de cada grão e é comumente chamado de massa de mil grãos (THOMAS; COSTA, 2010). No presente estudo, essa variável também não sofreu alterações em significativa em função das aplicações de Cu foliar.

A produtividade foi a variável que demonstrou as maiores diferenças estatísticas. Nos tratamentos 5 (120 g ha⁻¹ de óxido cuproso) e 7 (60 g ha⁻¹ Cu - Carbonato de Cu) obtivemos uma porcentagem de produtividade de 11 e 13% respectivamente maior que a testemunha. Isso representa 540,47 kg ha⁻¹ (9 sacos ha⁻¹) e 621,56 kg ha⁻¹ (10 sacos ha⁻¹) de acréscimo de produtividade. Fazendo essa relação com o valor atual da saca de soja (R\$ 75,00) encontra o valor de R\$ 675,00 ha⁻¹ e R\$ 750,00 ha⁻¹. O custo por hectare para a aplicação desses produtos comerciais, contendo óxido cuproso ou carbonato de Cu, varia de R\$ 10,00 a R\$ 15,00, sendo economicamente viável essa aplicação.

A produtividade foi diretamente afetada pela desfolha precoce e esta relacionada com a intensidade da severidade da FAS. Quanto maior a intensidade da severidade, maior é a desfolha da planta e menor a produtividade (NAVARINI et al., 2007). A desfolha induz a planta a alterar suas funções fisiológicas, passando menos fotoassimilados das folhas velhas para os grãos, invertendo assim a relação fonte/dreno. Ao invés de utilizar os carboidratos para a formação de grãos, as plantas induzem a formação de novas folhas (COSTA et al., 2003).

A explicação mais plausível para encontrarmos a maior produtividade nesses tratamentos, está associada aos menores índices de severidade da FAS apresentados

pelos tratamentos 5 (120 g ha⁻¹ óxido cuproso) e pelo tratamento 7 (60 g ha⁻¹ Cu - Carbonato de Cu), tendo assim menos folhas com sintomas da doença. Um maior número de folhas saudáveis permite que a planta tenha maior atividade fotossintética para atender a demanda do enchimento dos grãos (HENNING, 2014).

As folhas danificadas reduzem a atividade fotossintética, interceptando menos radiação, reduzindo a produção de assimilados (HENNING, 2014). Em casos severos, quando a doença atinge a soja na fase inicial do estágio reprodutivo, ou seja, na formação de flores, ela causa abortamento prematuro, resultando em perda total de rendimento. Em geral, as perdas de produtividade variam de 10 a 80% (BARROS et al., 2008).

Em relação às fontes de Cu utilizadas no trabalho, ambas são consideradas insolúveis ou parcialmente insolúveis. Se esses produtos fossem matérias primas puras, eles não apresentariam absorção a nível foliar, devida a baixa solubilidade. Não é o caso dos produtos comerciais utilizados nesse estudo, pois empresas com altas tecnologias, conseguem desenvolver produtos “acabados” como óxidos nanoparticulados e carbonatos com tratamentos químicos capazes de acidificar a nível de folhas para serem absorvidos. Devido a esse fato, da tecnologia empregada na produção dos produtos, a resposta não pode ser generalizada para todos os compostos comerciais contendo óxidos ou carbonatos.

Para a fonte de óxido cuproso, a maior produtividade foi visualizada no tratamento 5 (120 g ha⁻¹ óxido cuproso) a qual representa a maior dose testada de óxido cuproso, diferindo-se estatisticamente da testemunha e dos demais tratamentos dentro da fonte. Os tratamentos 2 (30 g ha⁻¹ óxido cuproso), tratamento 3 (60 g ha⁻¹ óxido cuproso) e o tratamento 4 (90 g ha⁻¹ óxido cuproso) os quais representam doses menores do micronutriente, não apresentaram diferença estatística de produtividade em relação à testemunha. Contudo, mesmo o tratamento 3 (60 g ha⁻¹ óxido cuproso) com a menor diferença de produtividade em relação à testemunha, esta atingiu aproximadamente 225 kg ha⁻¹, (4 sacos ha⁻¹). Se fosse levado em consideração somente esse parâmetro, essa aplicação, mesmo na menor dose, seria considerada economicamente viável.

Com isso, pode-se concluir que a utilização da fonte de óxido cuproso é economicamente viável, mesmo quando usada a menor dose estudada (30 g ha⁻¹ óxido cuproso). Todavia os resultados significativos na produtividade da cultura da soja se dão na maior dose estudada (120 g ha⁻¹) em detrimento a sua menor solubilidade e absorção pelas plantas, mesmo o produto sendo fabricado em nanopartículas.

Já para a fonte de Carbonato de Cu, independentemente do processo de fabricação, ela é considerada uma fonte parcialmente solúvel e dessa forma é absorvida em maior escala pelas plantas, em relação à fonte de óxido cuproso. Notou-se que a maior produtividade dentro dessa fonte foi apresentada pelo tratamento 7 (60 g ha⁻¹ Cu - Carbonato de Cu), justificando esta maior absorção. Verificou-se também, que mesmo para o tratamento 6 (30 g ha⁻¹ Cu - Carbonato de Cu), o qual obteve a menor diferença de produtividade em relação à testemunha, essa diferença foi de aproximadamente 100 kg ha⁻¹ (mais de 1,5 sacos ha⁻¹), ainda é economicamente viável, tendo em vista que o custo do produto comercial é menor que esse acréscimo de produtividade.

As reduções de produtividade visualizadas com o aumento das doses de carbonato de Cu no tratamento 8 (90 g ha⁻¹ de Cu - Carbonato de Cu) e no tratamento 9 (120 g ha⁻¹ de Cu - Carbonato de Cu) se devem ao excesso de Cu absorvido pelas plantas de soja, causando desequilíbrio nas concentrações do tecido foliar. Esses tratamentos foram os que mais acumularam Cu nas folhas, respectivamente, 40 e 61 mg kg⁻¹ de Cu na matéria seca (Tabela 5), ficando muito acima da faixa de suficiência para esse micronutriente que é de 5-20 mg kg⁻¹. Nos grãos, esses mesmos tratamentos acumularam respectivamente, 15,15 e 15,30 mg kg⁻¹ de Cu na matéria seca (Tabela 6), justificando novamente uma maior absorção dessa fonte, porém com um efeito negativo em produtividade.

O excessivo suplemento de Cu faz com que as plantas de soja gerem espécies reativas de oxigênio, elevando o efeito fitotóxico a nível celular (ANDRE, 2010). Além disso, quantidades excessivas de Cu nas folhas podem levar a inibição do crescimento, clorose e ao desfolhamento precoce (BOUAZIZI et al., 2010). Sánchez - Pardo et al. (2014) concordam que a aplicação foliar de uma dose elevada de sulfato de Cu, reduziu a capacidade fotossintética de plantas de soja, com perda da integridade das membranas

do cloroplasto, degradação do estroma, mudanças na estrutura dos tilacóides, redução da área foliar e da espessura da folha.

Concluiu-se nesse estudo, que o produto comercial a base de carbonato de Cu foi mais absorvido pelas plantas de soja, independente do processo de fabricação, devido principalmente ser uma fonte parcialmente insolúvel em água, resultado em diferenças estatísticas de produtividades já nas menores doses (60 g ha⁻¹ Cu - Carbonato de Cu), em relação ao produto comercial a base de óxido cuproso.

4.3 Micronutrientes em folhas de soja

Para as análises dos micronutrientes nas folhas de soja, os tratamentos não obtiveram efeitos significativos para o acúmulo de Fe e Zn ($p > 0,05$). Os tratamentos diferiram-se estatisticamente para o micronutriente Mn, tendo nos tratamentos 2, 3, 4, 5 e 9 os maiores acúmulos desse nutriente. Os demais tratamentos não diferiram entre si ($p > 0,05$). Para o micronutriente Cu, o tratamento 9 apresentou o maior acúmulo nas folhas, diferindo-se dos demais tratamentos ($p > 0,05$) (Tabela 5).

Tabela 5 - Micronutrientes nas folhas de soja sob variações de aplicações de cobre via folhar. Passo Fundo, RS, 2017

| Tratamentos | Fe (mg kg ⁻¹) | Zn (mg kg ⁻¹) | Mn (mg kg ⁻¹) | Cu (mg kg ⁻¹) |
|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 Testemunha | 114,00 ns | 35,10 ns | 201,75 b | 11,50 d |
| 2 30 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 133,50 | 35,55 | 367,50 a | 16,75 d |
| 3 60 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 106,50 | 35,35 | 350,25 a | 28,75 c |
| 4 90 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 109,50 | 37,70 | 386,75 a | 22,00 c |
| 5 120 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 103,50 | 30,45 | 365,50 a | 47,50 b |
| 6 30 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 109,50 | 36,30 | 277,75 b | 17,85 d |
| 7 60 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 111,00 | 31,45 | 292,50 b | 23,40 c |
| 8 90 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 102,00 | 32,85 | 242,25 b | 40,00 b |
| 9 120 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 109,50 | 42,70 | 318,75 a | 61,00 a |
| C.V. (%) | 13,33 | 14,45 | 21,73 | 17,98 |

Médias seguidas de diferentes letras nas colunas diferem entre tratamentos, conforme o Teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$); *ns* - não significativo; C.V. (%): coeficiente de variação; Fe: Ferro; Zn: Zinco; Mn: Manganês; Cu: Cobre.

As quantidades de micronutrientes na solução do solo são controladas pelos mecanismos de adsorção e precipitação. A adsorção ocorre na superfície dos colóides do solo, envolvendo ou não troca iônica, podendo esses ser complexados de forma irreversível, parcial ou reversível. A precipitação é dependente da quantidade do nutriente existente na solução do solo e a atividade microbiológica é responsável pelo controle do nível de nutrientes nessa solução, precisando a mesma estar em equilíbrio.

O Fe é pouco disponível na maioria dos solos agricultáveis, sendo considerado essencial para o desenvolvimento da soja (MARSCHNER et al., 2011). Nas plantas participa da constituição de várias enzimas, como catalase, peroxidase, citocromo oxidase e xantina oxidase e está relacionado a diversos processos e atividades metabólicas, como na respiração, fotossíntese, fixação de N₂ e na transferência de elétrons (MARENCO; LOPES, 2009).

Malavolta (2006) e Cancian (2018), mencionam que a faixa de suficiência para os micronutrientes, como o Fe, varia de 125-150 mg kg⁻¹ Fe na matéria seca. Nota-se que para esse micronutriente, apenas o tratamento 2 ficou acima da linha mínima de suficiência, acumulando 133,5 mg kg⁻¹ Fe na matéria seca. Na literatura é descrito um antagonismo de absorção entre os micronutrientes metálicos, mas não se justifica nesse caso, pois até a testemunha, que não recebeu as pulverizações de Cu, ficou abaixo dessa linha de suficiência. Este micronutriente não foi quantificado nas amostragens de solo, entretanto existe uma tendência de ele encontrar-se em deficiência no solo onde foi implantado o experimento.

O Zn é importante na produção do hormônio auxina (responsável pelo crescimento) – síntese de triptofano e metabolismo de triptamina. É constituinte das enzimas álcool desidrogenase, desidrogenase glutâmica, anidrase carbônica, entre outras. Devido a sua importância na síntese de auxina, sua maior concentração é exatamente nos meristemas de crescimento (TAIZ; ZEIGER, 2017). Frequentes aplicações de calcário no solo influenciam na concentração de Zn nas folhas de soja (PEREIRA; CARDOSO, 2012), fator que não ocorreu no presente trabalho pelo baixo pH encontrado nas análises de solo, indicando a falta de calagem do sistema.

Para o Zn, Malavolta (2006) e Cancian (2018) concordam com a faixa mínima de suficiência de 50-70 mg kg⁻¹ Zn na matéria seca. Neste estudo, percebe-se que todos os tratamentos ficaram abaixo dessa linha, tendo o melhor tratamento acumulado 42,70 mg kg⁻¹ Zn. Nesse caso, as pulverizações foliares de Cu causaram antagonismo na absorção de Zn, tendo em vista a elevada concentração inicial de Zn no solo (Tabela 1).

A aplicação foliar de Cu juntamente com as caldas fitossanitárias, foi capaz de elevar as concentrações foliares de Mn de forma significativa, a níveis muito acima da faixa de suficiência desse micronutriente (Tabela 5). Malavolta (2006), assim como Cancian (2018), referenciam que a faixa de suficiência do Mn está entre 35-50 mg kg⁻¹ Mn na matéria seca. Neste trabalho, verificamos que este micronutriente estava em altíssimas concentrações nas folhas analisadas no estágio fenológico R.6. Mesmo na testemunha, que foi o tratamento que menos acumulou Mn, os níveis foram de 201,75 mg kg⁻¹, estando quatro vezes acima da linha de suficiência. Já o tratamento 4 (90 g ha⁻¹ óxido cuproso), os níveis de Mn ficaram em 386,75 mg kg⁻¹, sendo este o maior acúmulo, chegando a quase oito vezes acima da linha de suficiência. Provavelmente, a aplicação de Cu beneficiou a absorção do Mn do solo, onde o mesmo se encontrava em altas concentrações, tendo em vista que esse micronutriente não foi adicionado nas caldas.

Para o Mn, existe uma relação entre a sua concentração no tecido vegetal e a severidade das doenças. Há concentrações maiores desse micronutriente em tecidos saudáveis sem relação à concentração inferiores em tecidos vitimados por doenças (HUBER; WILHELM, 1988). A menor concentração desse micronutriente foi encontrada na testemunha, sendo este tratamento também que obteve as maiores notas de severidade da FAS e a menor produtividade. Ou seja, nos tecidos que foram mais afetados pela FAS, existe uma menor deposição de Mn e isso resultou na diminuição da produtividade, confirmando a relação anterior.

Esse comportamento corrobora com outros trabalhos descritos na literatura onde a aplicação de Mn via aplicação foliar, tratamento de sementes ou adição no solo, auxiliou na redução da severidade de doenças (ZAMBOLIM; VENTURA, 1993).

Sakamoto et al. (2009) afirma que a eficácia de fungicidas no controle da FAS é significativamente elevada quando estes são misturados ao Mn.

Na biossíntese dos metabólitos secundário, via rota do ácido shiquímico, o Mn é um importante cofator para várias enzimas na produção de aminoácidos aromáticos fenólicos, cumarinas, ligninas e flavonóides. A concentração do Mn é afetada durante todo o período vegetativo, variando dentro da planta pela idade das folhas. Folhas velhas conseguem acumular altas concentrações do nutriente, entretanto uma pequena quantidade é translocada para as folhas novas em desenvolvimento, onde o elemento é deficiente e importante, exigindo uma complementação (HEENAN; CAMPBELL, 1980).

Para o Cu, Malavolta (2006) indicou a faixa de suficiência entre 12-15 mg kg⁻¹ Cu na matéria seca. Nesse estudo, verificamos que todos os tratamentos ficaram acima da faixa de suficiência, exceto a testemunha, com acúmulo de 11,5 mg kg⁻¹ Cu na matéria seca. Esse número nos indica uma deficiência de absorção de Cu pela testemunha, mesmo os teores de Cu encontrados nas análises de solo estarem em níveis elevados. Isso pode ter alterado a produção de compostos de resistência, afetando diretamente a proteção natural das plantas, consequentemente obteve os maiores índices de severidade da FAS, os menores teores de Cu nos grãos e a menor produtividade (Tabela 5).

Para ambas as fontes, ocorreu um aumento nos teores de Cu nos tecidos foliares com o aumento das doses de Cu. Isso se justifica devido principalmente ao mecanismo de absorção foliar de micronutrientes, onde os mesmos são absorvidos por diferencial de concentração, do meio mais concentrado para o meio menos concentrado. Baixas quantidades de Cu nos tecidos foliares estimulam a atividade da enzima peroxidase, enquanto em altas concentrações reduzem a atividade da mesma. A redução da atividade da peroxidase pode resultar no acúmulo de peróxidos de hidrogênio, devido o aumento da respiração dos tecidos afetados pela doença. A enzima responsável por degradar os peróxidos de hidrogênio é a catalase, a qual também tem a atividade reduzida na presença de altas concentrações de Cu.

A inibição dessas duas enzimas resulta num acúmulo de peróxidos de hidrogênio, moléculas com ação fungistática e bactericida. O decréscimo da peroxidase, também resulta no acúmulo de compostos fenólicos, tornando o tecido celular mais resistente aos patógenos. A alta concentração de Cu induz a atividade da enzima polifenoloxidase, responsável pela conversão de compostos fenólicos em quinonas. Em síntese, o Cu pode atuar induzindo resistência pelo aumento da síntese de peróxidos, compostos fenólicos e quinonas.

Na fonte de óxido cuproso, notamos que mesmo ocorrendo absorção via diferencial de concentração, ela é proporcionalmente menor comparada à fonte de Cu carbonato. Justificando isso, temos nos dados de Mn foliar uma maior proporção desse elemento, nos tratamentos com óxido cuproso. Ou seja, devido à menor interação de absorção com o óxido cuproso, as plantas conseguiram absorver maiores teores de Mn, em comparação a fonte de carbonato de Cu. Isso está novamente relacionado às formas de absorção das fontes, tendo a fonte de carbonato uma maior solubilidade em comparação ao óxido cuproso.

O tratamento 9 (120 g ha⁻¹ de Cu - Carbonato de Cu) obteve os maiores aumentos de Cu foliar, diferindo-se estatisticamente dos demais tratamentos. Este tratamento acumulou 61 mg kg⁻¹ Cu na matéria seca, porém não foi significativo para aumentar a produtividade. Pelo contrário, como já foi discutido anteriormente, por ser uma fonte parcialmente solúvel, ela absorveu mais Cu do que o benéfico para os tecidos e esse excesso de absorção, visualizado no acúmulo nas folhas, influenciou negativamente na produtividade.

Na anatomia foliar, a deficiência de Cu prejudica a lignificação das paredes celulares e vasos do xilema (MARSCHNER, 2012), deixando a planta mais vulnerável aos estresses bióticos e abióticos, afetando o desenvolvimento e produção das plantas. No entanto o excesso de Cu também é altamente prejudicial, causando fitotoxicidade celular. Fato que ocorreu nos tratamentos 8 (90 g ha⁻¹ Cu - Carbonato de Cu) e 9 (120 g ha⁻¹ Cu - Carbonato de Cu). Cansian observou incrementos na produtividade de grãos de soja com aplicações Cu foliar, atingindo 4546 e 4513 kg ha⁻¹ com aumentos de 3,1 e 2,4% respectivamente, nas doses de 10 e 20 g ha⁻¹.

4.4 Micronutrientes em grãos de soja

Nas análises dos micronutrientes nos grãos de soja, os tratamentos não obtiveram efeitos significativos para o acúmulo de Fe, Zn e Mn ($p > 0,05$). Os tratamentos diferiram-se estatisticamente somente para o micronutriente Cu, tendo nos tratamentos 5, 8 e 9 os melhores resultados. Os demais tratamentos não diferiram entre si (Tabela 6).

Tabela 6 - Micronutrientes nos grãos de soja sob variações de aplicações de cobre via foliar. Passo Fundo, RS, 2017

| Tratamentos | Fe (mg kg ⁻¹) | Zn (mg kg ⁻¹) | Mn (mg kg ⁻¹) | Cu (mg kg ⁻¹) |
|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 Testemunha | 61,20 ns | 38,10 ns | 36,90 ns | 13,45 b |
| 2 30 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 65,85 | 38,85 | 41,70 | 13,55 b |
| 3 60 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 67,65 | 37,95 | 39,75 | 14,20 b |
| 4 90 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 66,60 | 39,75 | 44,65 | 13,95 b |
| 5 120 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 60,15 | 37,80 | 36,60 | 16,00 a |
| 6 30 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 70,00 | 40,35 | 37,05 | 14,40 b |
| 7 60 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 67,35 | 39,00 | 38,70 | 14,60 b |
| 8 90 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 63,30 | 39,60 | 37,95 | 15,15 a |
| 9 120 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 65,40 | 39,45 | 43,50 | 15,30 a |
| C.V. (%) | 13,33 | 5,34 | 12,74 | 7,37 |

Médias seguidas de diferentes letras nas colunas diferem entre tratamentos, conforme o Teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$); ns - não significativo; C.V. (%): coeficiente de variação; Fe: Ferro; Zn: Zinco; Mn: Manganês; Cu: Cobre.

Solos com aplicações de elevadas doses de calcário, tendem a elevar o pH ao longo dos anos. Esse aumento gradual nos pH dos solos, pode levar à indisponibilidade dos micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn (FANCELLI, 2008). O déficit de micronutrientes essenciais resulta em desordens metabólicas, afetando a estrutura e as atividades enzimáticas (SCHUTZENDUBEL; POLLE, 2002). Entretanto a utilização sem prescrições e de forma indiscriminada pode resultar em fitotoxicidade, aumentando situações de estresse as plantas (FANCELLI, 2008).

Segundo Malavolta (2006), para que a interpretação dos teores de micronutrientes nos solos seja considerada alta, eles devem conter $> 0,4 \text{ mg dm}^3 \text{ Cu}$; $> 5,0 \text{ mg dm}^3 \text{ Mn}$; e $> 0,5 \text{ mg dm}^3 \text{ Zn}$. Teores de $< 0,2 \text{ mg dm}^3 \text{ Cu}$; $< 2,5 \text{ mg dm}^3 \text{ Mn}$ e $<$

0,5 mg dm³ Zn são consideradas baixas. Segundo essa interpretação, a área utilizada para a instalação do experimento continha concentrações altas de Cu, Mn e Zn (Tabela 1.1). Aliado a isso, a análise do solo realizada na área experimental mostra que o pH do mesmo se encontra em níveis considerados baixos em ambas as camadas (0-10 cm – pH 4,9) e (10-20cm – pH 4,8) (Tabela 2) o que favorece a disponibilidade desses micronutrientes para as plantas.

As principais funções do Fe estão nas formações de proteínas (grupos heme e não heme) nos cloroplastos; está envolvido no mecanismo de transferência de elétrons; na formação de clorofila; está diretamente ligado no metabolismo de ácidos nucléicos e exerce funções estruturais e catalíticas (DECHEN et al., 1991). No estudo, não se obteve diferenças estatísticas para o acúmulo desse micronutriente nos grãos de soja (Tabela 6).

O Zn é fundamental para manter a integridade das bio-membranas, protegendo os lipídeos e as proteínas contra danos oxidativos (KIRKBY; RÖMHELD, 2007). Na deficiência de Zn, ocorre redução do conteúdo de fosfolipídeos e vazamento de solutos devido ao aumento da permeabilidade da membrana plasmática (MARSCHNER, 2012). Malavolta et al. (2006) entendem que os maiores teores de Zn não estão na forma disponível às plantas e essa deficiência é um dos maiores limitantes da produção agrícola. Por outro lado, Cancian (2018), confere que o Zn está envolvido na fase reprodutiva das plantas e, conseqüentemente, na determinação da produtividade e da qualidade da cultura colhida. No entanto, no presente trabalho não encontramos diferenças estatísticas na quantidade de Zn entre os tratamentos estudados (Tabela 6).

O Mn atua na fotossíntese, estando envolvido na estrutura, funcionamento e multiplicação de cloroplastos, realizando o transporte de elétrons (TAIZ; ZEIGER, 2017). É um cofator e ativador de muitas enzimas, principalmente as ligadas a biossíntese de suberina e lignina (MARSCHNER, 2012). Independente da grande concentração de Mn encontrados nas folhas de soja, o mesmo não foi deslocado totalmente para os grãos, não apresentando diferenças estatísticas entre os tratamentos.

O último micronutriente estudado nos grãos de soja foi o Cu. A disponibilidade dele no solo é afetada pelas adubações fosfatadas, formando precipitados pouco solúveis do H_2PO_4 com esse cátion metálico (VITTI; TREVISAN, 2000). O Cu geralmente está em deficiência em solos com elevada presença de matéria orgânica, formando complexos estáveis, chegando a proporção de 98% do total de Cu complexado na solução do solo (CANCIAN, 2018). No solo em estudo, a quantidade de matéria orgânica verificada nas amostragens foi de 2,7% na camada de 0-10 cm e de 1,9% na camada de 10-20 cm, sendo considerada baixa. Além disso, o baixo pH também auxilia para a maior disponibilidade desse micronutriente (Tabela 1.1).

No presente trabalho, os tratamentos 5, 8 e 9, com as maiores doses de Cu para ambas as fontes, foram os que apresentaram diferenças estatísticas em relação à testemunha e aos outros tratamentos. Esses mesmos tratamentos, na análise do Cu foliar tiveram valores superiores a 40 mg kg^{-1} Cu na matéria seca (Tabela 5). Igualmente a análise foliar, a testemunha, embora não estatisticamente menor a outros tratamentos, foi a que menos acumulou Cu nos grãos, com $13,45 \text{ mg kg}^{-1}$ Cu. Isso se deve a leve deficiência de Cu encontrada nas folhas de soja.

O Cu das aplicações mais tardias (3ª e 4ª aplicações) com a planta já no estágio reprodutivo foi basicamente usado nutricionalmente para a produção dos tecidos mais jovens. Nas plantas onde foram realizadas as aplicações de Cu, o mesmo se deslocou dos tecidos mais velhos para os grãos. Segundo Godoy et al. (2017), o Cu tem mobilidade restrita, e é dependente do teor no tecido: em plantas bem nutridas vai com facilidade até os grãos, enquanto nas deficientes esse movimento é dificultado.

Quando analisamos dentro dos tratamentos de cada fonte, notamos que o tratamento 5 (120 g ha^{-1} óxido cuproso) foi estatisticamente mais acumulado nos grãos. Isso se deve ao maior acúmulo nas folhas, em relação às doses mais baixas do produto comercial, apresentando também menores índices de severidade da FAS e maior produtividade. Esse efeito está relacionado principalmente à forma de absorção de micronutrientes (gradiente de concentração) e a solubilidade menor da fonte.

Dentro da fonte de carbonato de Cu, os maiores acúmulos se deram nos tratamentos 8 (90 g ha⁻¹ Cu - Carbonato de Cu) e no tratamento 9 (120 g ha⁻¹ Cu - Carbonato de Cu), os quais acumularam maiores teores de Cu nos grãos. Isso também se deve aos maiores acúmulos de Cu nas folhas, onde a planta conseguiu translocar esse micronutriente até os órgãos reprodutivos. Mas para essa fonte, como já discutido, esse aumento nos teores de Cu foliares e nos órgãos de reservas não foi benéfico, por mais que tenha diminuído os índices de severidade da FAS, esse aumento não proporcionou aumento em produtividade.

Em solos deficientes em Cu, a correção até pode ser feita via aplicação foliar ou via tratamento de semente, mas para ter os níveis críticos efetivamente corrigidos, o ideal é que seja feita adubação no sulco de semeadura, observando as melhores fontes para esse propósito.

4.5 Lignina

Na análise de lignina, os tratamentos 2, 3, 4, 5 e 9 obtiveram os maiores acúmulos de lignina ($p > 0,05$). Os demais tratamentos não diferiram entre si ($p > 0,05$) (Tabela 7).

Tabela 7 - Teor de lignina em folhas de soja sob variações de fontes e doses de cobre (Cu) aplicadas via foliar. Passo Fundo, RS, 2017

| Tratamentos | Lignina g kg ⁻¹ MS |
|--|-------------------------------|
| 1 Testemunha | 153,55 b |
| 2 30 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 162,85 a |
| 3 60 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 161,37 a |
| 4 90 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 178,97 a |
| 5 120 g ha ⁻¹ de Cu - (Óxido cuproso) | 170,85 a |
| 6 30 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 140,60 b |
| 7 60 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 137,12 b |
| 8 90 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 146,15 b |
| 9 120 g ha ⁻¹ de Cu - (Carbonato de Cu) | 158,52 a |
| C.V. (%): | 7,71 |

Médias seguidas de diferentes letras nas colunas diferem entre tratamentos, conforme o Teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$); ns - não significativo; C.V. (%): coeficiente de variação; MS: matéria seca.

Nas plantas existem três grupos de metabólitos secundários: compostos fenólicos, terpenos e alcalóides, os quais são sintetizados e utilizados nas defesas contra estresses bióticos e abióticos. Dentro dos compostos fenólicos, têm-se os flavonóides, taninos e ligninas (TAIZ; ZEIGER, 2017). A lignina desempenha uma função importante na resistência das plantas ao ataque por patógenos por promover o fortalecimento da parede celular, variando seus precursores da biossíntese de acordo com as espécies cultivadas (SAAD, 2010).

Os maiores acúmulos de lignina na matéria seca ocorreram nos tratamentos com a fonte de óxido cuproso, sendo que todos os tratamentos produziram mais lignina que a testemunha, variando de 5 a 14% de acréscimo. Por ser uma fonte insolúvel, provavelmente ela foi absorvida de forma mais lenta pelas plantas de soja, apesar do gradiente de concentração, ficando disponível para a atuação nas rotas de produção de compostos de defesa, como no caso da lignina.

Esses aumentos nos teores de lignina foliares são reflexos dos aumentos nos teores de Cu nas folhas e nos grãos, os quais foram capazes de diminuir a severidade da FAS de forma significativa, no entanto foram eficazes somente para aumentar a produtividade no tratamento 5 (120 g ha^{-1} óxido cuproso), o qual se diferiu da testemunha e dos demais tratamentos dessa fonte.

Quando comparamos apenas a severidade da FAS entre as fontes, percebemos que as maiores notas visuais da doença estão justamente nesses tratamentos de óxido de Cu (Tabela 3). Ou seja, a planta para se defender do ataque do patógeno, induz uma maior biossíntese e deposição de lignina nos sítios de infecções, gastando energia e fotoassimilados que seriam utilizados para o enchimento de grãos, fazendo com que essas alterações na morfologia da planta não se resultem em aumento da produtividade da cultura. No tratamento 4, (90 g ha^{-1} de óxido cuproso) obtivemos o maior percentual de acúmulo de lignina, com 14% de aumento em relação à testemunha. Esse acréscimo resultou na diminuição significativa do progresso da severidade da FAS, entretanto esse foi um dos tratamentos com as maiores notas de severidade, excluindo a testemunha. Em produtividade, esse tratamento em específico não representou aumentos.

Para a fonte de carbonato de Cu, somente o tratamento 9 (120 g ha⁻¹ Cu - Carbonato de Cu) acumulou maiores teores de lignina nas folhas em relação à testemunha. Esse acréscimo foi de apenas 3%. Os demais tratamentos dentro dessa fonte sintetizaram menores teores de lignina que a testemunha. Por ser uma fonte parcialmente solúvel em relação ao óxido cuproso e dessa forma ser mais absorvida pelas plantas de soja, representados pelos visíveis aumentos nos teores foliares e nos grãos e apresentando diminuição dos teores foliares de Mn, pela interação de absorção entre micronutrientes. Essa fonte de Cu provavelmente não tem ação direta na biossíntese de ligninas e sim na produção de fitoalexinas.

Como foi mais absorvida, uma hipótese seria no estímulo a maior produção de fitoalexinas e essas substâncias foram igualmente responsáveis pelos resultados na diminuição da severidade da FAS, onde percebe-se uma tendência dessa fonte de terem menores notas visuais da doença e conseqüentemente ter aumento de produtividade, mesmo na dose de 60 g ha⁻¹ Cu - Carbonato de Cu (tratamento 7).

Outra explicação cabível pode ser pela ação direta dessa fonte na germinação dos esporos dos fungos na superfície da folha, pois analisando o tratamento 7 (60 g ha⁻¹ Cu - Carbonato de Cu) em específico, o qual obteve o menor avanço da severidade e apresentou a maior produtividade, nota-se que este foi o tratamento com a menor expressão da biossíntese de lignina, sintetizando 12% a menos de lignina que a testemunha. Ou seja, pela maior ação direta como fungicida natural, as plantas produziram maiores quantidades de grãos, sem a necessidade de gastar fotoassimilados para a produção de mecanismos de defesa. Todavia segundo a literatura, essas doses são consideradas baixas para ter ação fungistática.

Chich-Cheng et al. (2005) investigaram o efeito do Cu no crescimento das raízes de soja e verificaram alterações nos níveis de peróxido de hidrogênio, atividade das enzimas lacase e peroxidase e no conteúdo de lignina. O teor de lignina aumentou em três vezes em relação ao controle. Os autores concluíram que as lacases foram responsáveis pela biossíntese da lignina. Com o prolongamento dos tratamentos, as peroxidases e lacases atuaram juntas para a biossíntese da lignina. Toyota (2008) utilizando fosfito de cobre em casa de vegetação observou aumento na atividade da

peroxidase, quitinase e no teor de fenóis solúveis totais. Santos et al. (2011), a partir de eliciador proveniente de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense*, induziram a biossíntese de lignina em raízes de bananeira, correlacionado com uma resistência maior a esse patógeno. Em cultivares de soja resistentes a nematóides, a lignificação da parede celular é estimulada ao redor de lesões virais e nas células vizinhas (REED et al., 1979).

5 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho, a adição de carbonato de Cu ou óxido cuproso em caldas fitossanitárias no cultivo de soja podem:

- reduzir a severidade da ferrugem-asiática;
- aumentar os teores de Cu nas folhas;
- aumentar os teores de Cu nos grãos;
- aumentar os teores de lignina foliar;
- influenciar a composição do rendimento de grãos e a produtividade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Brasil, existem resultados consistentes em relação à utilização de micronutrientes, principalmente quando pensamos nas condições do Cerrado, onde estudos feitos pela Fundação MS mostraram que na média de 12 estudos com micronutrientes aplicados via sementes, houve incremento de até 6,5 sacas ha⁻¹ na produtividade da soja. É evidente que existe uma resposta positiva em produtividade com o uso de micronutrientes, porém os processos fisiológicos envolvidos ainda não estão completamente elucidados, principalmente pelos insuficientes estudos para obter essa afirmação, tendo em vista a complexidade e a variedade de fatores que podem alterar as respostas das plantas aos micronutrientes.

Para o uso de micronutrientes na soja, não basta apenas à avaliação da produtividade, devendo ser agregada análises dos efeitos diretos na fisiologia vegetal, no complemento do controle de doenças e nos aspectos econômicos. Essas variáveis são fundamentais na tomada de decisão para o uso ou não dessas tecnologias, sendo que a resposta encontrada é dependente da combinação desses fatores.

Diante disso, há a necessidade de aprofundar o estudo em questão, considerando analisar as enzimas e proteínas envolvidas no processo de deposição de lignina, bem como entender o processo de movimentação dos micronutrientes dentro das plantas, além de quantificar fitoalexinas, compostos fenólicos. Aplicações noturnas podem aumentar à taxa de fixação dos nutrientes as ceras componentes das membranas, colaborando para maiores taxas de penetração desses micronutrientes. Trabalhos com variações de tamanho de partículas dos micronutrientes, adjuvantes e surfactantes na calda também podem colaborar para aumentar a taxa de penetração e a movimentação desses nutrientes via simplasto. Importante também é detalhar a movimentação interna desses micronutrientes, bem como o uso de íons acompanhantes no processo de absorção.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, W. S. A method of computing the effectiveness of a insecticide. **Journal Economic Entomology**, v. 18, n. 2, p. 265-267, 1925.
- ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. eds. **Fertilidade do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 645-736.
- AGUIAR, L. A. Efeito de formulações cúpricas e cuprorgânicas na severidade da mancha-bacteriana e na população residente de *Xanthomonas campestris* sp. *Vesicatoria* em pimentão. **Horticultura Brasileira**, v. 21, n. 1, p. 44-50, 2003.
- AGRIOS, G. N. **Plant Pathology**. 5 ed. Amsterdam: Elsevier, 2004. 922 p.
- ALFARO, A. T. S; TROJAN, D. G. **Agronomia: elo da cadeia produtiva**. 1 ed. Ponta Grossa: Atena Editora, 2018. 414 p.
- ALMEIDA, A. M. R.; FERREIRA, L. P.; YORINORI, J. T.; SILVA, J. F. V.; HENNING, A. A.; GODOY, C. V.; COSTAMILAN, L. M.; MEYER, M. C. Doenças da soja. In: KIMATI, H.; AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A. **Manual de Fitopatologia**. 4 ed., São Paulo: Agronômica Ceres, 2011. 663 p.
- ALVES, V. M. **Fungicidas protetores no manejo da ferrugem da soja, processos fisiológicos e produtividade da cultura**. 2016. 99 f. Dissertação - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- ANDRADE, J. E.; CASSETARI, NETO, D.; MACAHADO, A. Q.; VILELA, P. M. C. A. Aplicação de programas de adubação foliar com silício e potássio associados a fungicidas no controle de ferrugem-asiática na cultura da soja. **Bioscience Journal**. v. 31, n. 1, p. 18-24, 2015.
- ANDRE, C. M. Dietary antioxidants and oxidative stress from a human and plant perspective: a review. **Current Nutrition and Food Science**, v. 6, n. 1, p. 2-12, 2010.
- ANTUNIASSI, U. R. **Tecnologia de aplicação de defensivos**. 1 ed., Botucatu: UNESP, 2012.
- ANTUNIASSI, U. R. Qualidade em tecnologia de aplicação de defensivos. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 2016, São Paulo, Faculdade de Ciências Agronômicas/UNESP, 2015.
- AZEEZ, M. O. Effect of copper (Cu) application on soil availability nutrients and uptake. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 5, p. 359–364, 2015.

AZEVEDO, L. A. S. **Proteção integrada de plantas com fungicidas: teoria, prática e manejo**. São Paulo, Ed. do Autor, 2001, p. 230.

BALARDIN, R. S.; DALLAGNOL, L. J.; DIDONÉ, H. T.; NAVARINI, L. Influência do Fósforo e do Potássio na Severidade da Ferrugem da Soja *Phakopsora pachyrhizi*. **Fitopatologia Brasileira**, v. 31, n. 5, p. 462-467, 2006.

BARBOSA, I. R. H. Foliar copper uptake by maize plants: effects on growth and yield. **Ciência Rural**, v. 43, n. 9, p. 1561-1568, 2013.

BARROS, H. B.; SEDIYAMA, T.; REIS, M. S.; CECON, P. R. Efeito do número de aplicações de fungicidas no controle da ferrugem-asiática da soja. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, n. 2, p. 239-245, 2008.

BRAGA, M. R. Fitoalexinas. In: In: PASCHOLATI, S.F.; LEITE, B.; STANGARLIN, J.R.; CIA, P. **Interação planta-patógeno: fisiologia, bioquímica e biologia molecular**. Piracicaba-SP. Ed. FEALQ. v. 13. 2008, p. 305-346.

BÖHM, G. M. B.; ROMBALDI, C. V. Transformação genética e aplicação de glifosato na microbiota do solo fixação biológica de nitrogênio, qualidade e segurança de grãos de soja geneticamente modificada. **Ciência Rural**, v. 40, n. 1, p. 213-221, 2010.

BONALDO, S. M.; PASCHOLATI, S. F., ROMEIRO, R. S. Indução de resistência: noções básicas e perspectivas. In: CAVALCANTI, L. S.; DI PIERO, R. M.; CIA, P.; PASCHOLATI, S. F.; RESENDE, M. L. V.; ROMEIRO, R. S. **Indução de resistência em plantas a patógenos e insetos**. Piracicaba: FEALQ, 2005, p. 11-28.

BOSCHIERO, B. N. **Adubação nitrogenada em soqueiras de cana-de-açúcar: influência do uso em longo prazo de fontes e/ou doses de nitrogênio**. 2017, 233 f. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

BOUAZIZI, H. JOUILI, H.; GEITMANN, A.; FERJANI, E. Copper toxicity in expanding leaves of *Phaseolus vulgaris* L.: antioxidant enzyme response and nutrient element uptake. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 73, n. 6, p. 1304- 1308, 2010.

BRAVIN, M. N.; GARNIER, C.; LENOBLE, V.; GÉRARD, F; DUDA, Y; HINSINGER, P. Root-induced changes in pH and dissolved organic matter binding capacity affect copper dynamic speciation in the rhizosphere. **Geochim Cosmochim Acta**, v. 84, n. 1, p. 256-268, 2012.

BRUNETTO, G.; LORENSINI, F.; CERETTA, A.; GATIBONI, L. C.; TRENTIN, G.; GIROTTI, E.; MIOTTO, A.; LOURENZI, C. R.; MELO, G. W. B. Soil phosphorus fractions in a Sandy Typic Hapludaf as affected by phosphorus fertilization and grapevine cultivation period. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 44, n. 13, p.1937-1950, 2013.

CAMPBELL, C. L.; MADDEN, L. V. **Introduction to plant disease epidemiology**, 1. ed. New York: Journal Wiley, 1990. 532 p.

CANCIAN, M. Aplicação de cobre na cultura da soja em solos com altos teores de fósforo. 2018. 77 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria – RS, Santa Maria, 2018.

CARMO, D. L. Micronutrientes em solo e folha de cafeeiro sob sistema agroflorestal no sul de minas gerais. **Coffee Science**, v. 7, n. 1, p. 76-83, 2012.

CARVALHO, N. L.; BARCELLOS, A. L. Adoção do manejo integrado de pragas baseado na percepção e educação ambiental. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 5, n. 5, p. 749-766, 2012.

CARVALHO, V. L.; CUNHA, R. L.; SILVA, N. R. N. Alternativas de controle de doenças do cafeeiro. **Coffee Science**, v. 7, n. 1, p. 42-49, 2012.

CARVALHO, D. D. O. Adubação nitrogenada e potássica na severidade da antracnose em dois cultivares de milho. **Revista Ceres**, v. 60, n. 3, p. 21, 2012.

CATTELAN, A.; DALL'AGNOL, A. The rapid soybean growth in Brazil. **Oilseeds and fats, Crops and Lipids - OCL**, v. 25, n. 1, p. 1-12, 2018.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos – Safra 2016/2017 - 2017**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

CONSÓRCIO ANTIFERRUGEM. Parceria público-privada no combate à ferrugem-asiática da soja. Disponível em: <<http://www.consorcioantiferrugem.net/#/main>>. Acesso: 26 out. 2017.

COSTA, M. A. G.; BALARDIN, R. S.; COSTA, E. C.; GRÜTZMACHER, A. D.; SILVA, M. T. B. Níveis de desfolha na fase reprodutiva da soja, cv. Ocepar 14, sobre dois sistemas de cultivo. **Ciência Rural**, v. 33, n. 5, p. 813-819, 2003.

COUTINHO, C. F. B.; MAZO L. H. Complexos metálicos com o herbicida glifosato: revisão. **Química Nova**, v. 28, n. 6, p. 1038-1045, 2005.

CHABOUSSOU, F. **Plantas doentes pelo uso de agrotóxicos: a teoria da trofobiose**. 2 ed. Porto Alegre: L & PM, 1995. 256 p.

CHIH-CHENG, L.; LI-MING, C.; ZIN-HUANG, L. Rapid effect of copper on lignin biosynthesis in soybean roots. **Plant Science**, v. 168, n. 3, p. 855-861, 2005.

CHRISTENSEN, A. B.; CHO, B. H.; NÆSBY, M.; GREGERSEN, P. L.; BRANDT, J.; MADRIZ-ORDEÑA, K.; COLLINGE, D. B.; THORDAL-CHRISTENSEN, H. The molecular characterization of two barley proteins establishes the novel PR-17 family of pathogenesis-related proteins. **Molecular Plant Pathology**, v. 3, n. 3, p. 135-144, 2002.

CUNHA, J. P. A. R.; ALVES, G. S. Características físicoquímicas de soluções aquosas com adjuvantes de uso agrícola. **Interciência**, v. 34, n. 9, p. 655-659, 2009.

CUNHA, J. P. A. R. da; ALVES, G. S.; MARQUES, R. S. Tensão superficial, potencial hidrogeniônico e condutividade elétrica de caldas de produtos fitossanitários e adjuvantes. **Ciência Agrônômica**, v. 48, n. 2, p. 261-270, 2017.

DECHEN, A. R.; HAAG, H. P.; CARMELLO, Q. A. de C. Função dos micronutrientes nas plantas. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. In: SIMPOSIO SOBRE MICRONUTRIENTES NA AGRICULTURA, 1., 1988, Jaboticabal. **Anais**. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991.

DEL PONTE, E. M.; ESKER, P. D. Considerações epidemiológicas na avaliação de risco e manejo da ferrugem-asiática da soja. **Fitopatologia Brasileira**, v. 32, n.1, p. 58-60, 2008

DELEN, N.; TOSUN, N. Fungicidas: mecanismos de ação e resistência. Parte 1: Fungicidas com mecanismos de ação não-específica. In: LUZ, W. C. (Ed.) **Revisão Anual de Patologia de Plantas**. Passo Fundo, 2003. p. 43-69.

DIAS, W. P.; SILVA, J. F. V.; CARNEIRO, G. E. S.; GARCIA, A.; ARIAS, C. A. A. **Nematóide de Cisto da Soja: Biologia e manejo pelo uso da resistência genética**. Londrina: Embrapa Soja, 2009 (Circular técnica, 76).

DURÃO, C. F; BOLLER, W. Spray nozzles performance in fungicides applications for Asian soybean rust control. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 37, n. 4, p. 709-716, 2017.

EMPRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS. **Informações meteorológicas 2016/2017**. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/app/principal/agromet.php>>. Acesso em: 9 nov. 2017.

EKER, S.; OZTURK, L.; YAZICI, A.; ERENOGLU, B.; ROMHELD, V.; CAKMAK, I. Foliar-applied glyphosate substantially reduced uptake and transport of iron and manganese in sunflower (*Helianthus annuus* L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 54, n. 26, p. 10019-10025, 2006.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. S.; MELO, L. C. Resposta de genótipos de feijão à aplicação de cobre. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 11., 2014, Londrina. Tecnologias para a sustentabilidade da cultura do feijão: **Anais**.

Londrina: IAPAR, 2014. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/105965/1/184-2.pdf> Acesso em: 07 nov. 2016.

FANCELLI, A. L. Influência da nutrição na ocorrência de doenças de plantas. In: FANCELLI, A. L. **Milho: nutrição e adubação**. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV, p. 1-35, 2008.

FAO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA - **How to Feed the World in 2050**. p. 1-35. Disponível em: <http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2017.

FAVARIN, J. L.; MARINI, J. P. **Importância dos micronutrientes para a produção de grãos**. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <<http://www.snagricultura.org.br/artigos/artitec-micronutrientes.htm>>. Acesso em: 25 mar. 2017.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of soybean development. **Iowa State University of Science and Technology**, p. 11, 1977.

FERNANDES, C. F.; MORAES, V. C. P.; VASCONCELOS, I. M.; SILVEIRA, J. A. G.; OLIVEIRA, J. T. A. Induction of an anionic peroxidase in cowpea leaves by exogenous salicylic acid. **Journal of Plant Physiology**, v. 163, n. 10, p. 1040-1048, 2006.

FERNANDEZ, V.; SOTIROPOULOS, T.; BROWN, P. H. **Foliar Fertilization: principles and practices**. Paris: International Fertilizer Industry Association - IFA, 2013.

FIALLOS, R. R. G. A ferrugem-asiática da soja causada por *Phakopsora pachyrhizi* Sydow e Sydow. **Ciencia y Tecnologia**, v. 4, n. 2, p. 45-60, 2011.

FINKEL, T. Redox-dependent signal transduction. **FEBS Letters**, v. 476, n. 1-2, p. 52-54, 2000.

FORCELINI, C. A. Fungicidas inibidores da síntese de esteróis. I. Triazoles. **Revisão Anual de Patologia de Plantas**, v. 2, p. 335-355, 1994.

FRAC - FUNGICIDE RESISTENCE ACTIO COMMITTEE. Disponível em: <<http://www.frac.info>>. Acesso em: 21 out. 2017.

FUMIKO, M. I. Principais doenças da cultura da soja e manejo integrado. **Nucleus**, v. 10, n. 3, p. 83-102, 2013.

GARCIA, A.; CALVO, E. S.; KIIHL, R. A. S.; HARADA, A.; HIROMOTO, D. M.; VIEIRA, L. G. E. Molecular mapping of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) resistance genes: discovery of a novel locus and alleles. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 117, n. 4, p. 545- 553, 2008.

GARCION, C.; LAMOTTE, O.; MÉTRAUX, J. P. Mechanisms of defence to pathogens: biochemistry and physiology. In: WALTERS, D.; NEWTON, A.; LYON, G. (Ed.). **Induced resistance for plant defence – a sustainable approach to crop protection**. Oxford: Blackwell, p. 109-132, 2007.

GARDIANO, C. G. Manejo químico da ferrugem-asiática da soja, baseado em diferentes métodos de monitoramento. **Arquivo Instituto Biológico**, v. 77, n. 3, p. 497-504, 2010.

GATIBONI, L. C. 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.

GELAIN, E. Fixação biológica de nitrogênio e teores foliares de nutrientes na soja em função de doses de molibdênio e gesso agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 2, p. 259-269, 2011.

GODOY, C. V.; CANTERI, M. G. Efeitos protetor, curativo e erradicante de fungicidas no controle da ferrugem da soja causada por *Phakopsora pachyrhizi*, em casa de vegetação. **Fitopatologia Brasileira**, v. 29, n. 1, p. 97-101, 2004.

GODOY, C.; KOGA, L. J.; CANTERI, M. G. Diagrammatic scale for assessment of soybean rust severity. **Fitopatologia Brasileira**, v. 31, n. 1, p. 63-68. 2006.

GODOY, C. V.; UTIAMADA, C. M. MEYER, M. C.; CAMPOS, H. D.; FORCELINI, C. A.; PIMENTA, C. B.; BORGES, E. P.; SIQUERI, F. V.; JULIATTI, F. C.; FAVARO, F.; FEKSA, H. R.; GRIGOLLI, J. F. J.; NUNES JUNIOR, J. CARNEIRO, L. C.; SILVA, L. H. C. P.; SATO, L. N.; CANTERI, M. G.; VOLF, M. R.; DEBORTOLI, M. P.; GOUSSAIN, M.; MARTINS, M. C.; BALARDIN, R. S.; FURLAN, S. F.; MADALOSSO, T.; CARLIN, V. J.; VENANCIO, W. S. **Eficiência de fungicidas para o controle da ferrugem-asiática da soja, *Phakopsora pachyrhizi*, na safra 2016/17: resultados sumarizados dos ensaios cooperativos**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. (Circular Técnica, 129).

GOODMAN, R. N; KIRÁLY, Z; WOOD, K. R. **The biochemistry and physiology of plant disease**. 1. ed. Columbia, University of Missouri Press, p. 433, 1986.

GORJANOVIĆ, S. A Review: Biological and Technological Functions of Barley Seed Pathogenesis-Related Proteins (PRs). **Journal of The Institute of Brewing**, v. 115, n. 4, p. 334–360, 2009.

GUO, X. Y.; ZUO, Y. B.; WANG, B. R.; LI, J. M.; MA, Y. B. Toxicity and accumulation of copper and nickel in maize plants cropped on calcareous and acidic field soils. *Plant and Soil*, v. 333, n. 1-2, p. 365-373, 2010.

HAMMOND-KOSACK, K.; JONES, J. D. G. Responses to plant pathogens. In: BUCHANAN, B. B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. L. **Biochemistry & molecular biology of plants**. 1 ed. Rockville: American Society of Plant Physiologists, p. 1102-1156, 2000.

HENDRIKS, A. T. W. M.; ZEEMAN, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 1, p. 10-18, 2009.

HEENAN, D. P.; CAMPBELL, L. C. Transport and distribution of manganese in two cultivars of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill.) **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 31, n. 5, p. 943 - 949, 1980.

HENNING, A. A. **Manual de identificação de doenças de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2014. (Documento 256).

HUBER, D. M.; WILHELM, N. S. The role of manganese in resistance to plant disease. In: GRAHAM, R. D.; HANNAM, R. J.; UREN, N. C. (Eds.) **Manganese in soils and plants**. Kluwer Academic Publishers, p. 155-173, 1988.

HUBER, D. M. Relationship between mineral nutrition of plants and disease incidence. In: WORKSHOP, Piracicaba: Potafós **Anais e vídeo**, 2002.

HUBER, D. M. Strategies to ameliorate glyphosate immobilization of manganese and its impact on the rhizosphere and disease. In: LORENZ, N.; DICK, R. **Proceedings of the Glyphosate Potassium Symposium**, 2006. Iowa: Ohio State University, AG Spectrum, DeWitt, Iowa, 2006.

HUSSAIN, S.; PENG, S.; FAHAD, S.; KHALIQ, U.; HUANG, J. , CUI, K.; NIE, L. Rice management interventions to mitigate green house gas emissions: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n.5, p. 3342-3360, 2015.

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, n. 10, p. 1550-1554, 2012.

IURKIV, L.; ECKSTEIN, B.; BALBI-PENA, M. I.; STANGARLIN, J. R.; SCHWAN-ESTRADA, K. R. F. Histopatologia da interação entre *Alternaria solanica* tomateiro tratado com *Curcuma longa*. **Summa Phytopathologica**, v. 32, n. 1, p. 28, 2006.

ISHIGE, F.; MORI, H.; YAMAZAKI, K.; IMASEKI, H. Identification of a basic glycoprotein induced by ethylene in primary leaves of azuki bean as a cationic peroxidase. **Plant Physiology**, v. 101, n. 1, p. 193-199, 1993.

JANAS, K. M.; CVIKROVÁ, M.; PALAGIEWICZ, A.; EDER, J. Alterations in phenylpropanoid content in soybean roots during low temperature acclimation. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 38, n. 7-8, p. 587-593, 2000.

JOHAL, G. S.; GRAY, J.; GRUIS, D.; BRIGGS, S. P. Convergent insights into mechanisms determining disease and resistance response in plant-fungal interactions. **Canadian Journal Botany**, v. 73, n. 1, p. 468-474, 1995.

JULIATTI, F. C.; SAGATA, E.; JACCOUD FILHO, D. de S.; JULIATTI, B. C. M. Métodos de inoculação e avaliação da resistência de genótipos de soja à *Sclerotinia sclerotiorum*. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 4, p. 958-968, 2014.

KAVALIER, A. **The effects of methyl jasmonate on the anthocyanin content and growth rates of the Wisconsin fast plants *Brassica rapa***. Research performed at the College of Charleston, Charleston: College of Charleston, 2000.

KAWUKI, R. S.; ADIPALA, E.; TUKAMUHABWA, P. Yield loss associated with soya bean rust (*Phakopsora pachyrhizi* Syd.) in Uganda. **Journal of Phytopathology**, v. 151, n. 1, p. 7-12, 2003.

KIRKBY, E. A.; RÖMHELD, V. Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade. 2007. Disponível em: <<http://www.potafos.org/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/d20fb44d85259bf7032572530062870e/sfile/encarte-118.pdf>> Acesso em 23 nov. 2016.

KUMAR, C. J. N.; RAJANGAM, J.; BALAKRISHNAN, K.; BORA, L. Influence of foliar fertilization of micronutrients on leaf micro nutrient status of mandarin orange in lower pulney hills. **International Journal of Current Microbiology and Applied Science**, v. 5, n. 5, p. 516-522, 2017.

LAI, Y. R.; LIN, P. Y.; CHEN, C. Y.; HUANG, C. J. Feasible management of southern corn leaf blight via induction of systemic resistance by *bacillus cereus* in combination with reduced use of dithiocarbamate fungicides. **Plant Pathology Journal**, v. 32, n. 5, p. 484-488, 2016.

LA PARTE, E. M. de; FUNDORA, J. A; GARCIA, D. Presencia de *gaemannomyces graminis* var. *graminis* y magna *porthesalvinii* en variedades de arroz cultivadas en Cuba. **Fitosanidad**, v. 18, n. 3, p. 163-168, 2014.

LANGENBACH, C.; CAMPE, R.; BEYER, S. F.; MUELLER, A. N.; CONRATH, U. Fighting asian soybean rust. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 797, 2016.

LIMA, M. D. de; Potassium fertilization and sowing seasons on protein yield in soybean cultivars. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 21, n. 6, p. 392-397, 2017.

LIRA, M. V. S. **Adubação de plantio e foliar com micronutrientes na produção da cana-de açúcar**. Dissertação - Ciência e Tecnologia Animal da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Paulo 2018. 87 f. disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/153046/lira_mv_s_me_dra.pdf?sequence=4&isAllowed=y>. Acesso em: 12 jan. 2018.

LO, C. S. C.; NICHOLSON, R. L. Phenolic compounds and their importance in plant disease, In: LEITE, B. **Physiology, biochemistry, and molecular biology of plant-pathogen interactions**. Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz - FEALQ, p. 285-303, 2008.

MADALOSSO, M; MARQUES, L; MINUZZI, S. **Parâmetros de avaliação da qualidade da calda de aplicação**. Disponível em: <<https://phytusclub.com/materiais-didaticos/parametros-de-avaliacao-da-qualidade-da-calda-de-pulverizacao/>>. Acesso em 28 de mar. 2018.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 ed., Piracicaba: Potafós, 1997. 319 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006, 631 p.

MANTOVI, P.; BONAZZI, G.; MAESTRI, E.; MARMIROLI, N. Accumulation of copper and zinc from liquid manure in agricultural soils and crop plants. **Plant and Soil**, v. 250, n. 2, p. 249-257, 2003.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/noticias/mapa-suspende-registro-de-63-fungicidas-para-controle-da-ferrugem-da-soja>>. Acesso em: 07 abr. 2018.

MARENCO R. A.; LOPES N. F. **Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. 3 ed., Viçosa: Editora UFV, 2009.

MARSCHNER, P.; CROWLEY, D.; RENGEL, Z. Rhizosphere interactions between microorganisms and plants govern iron and phosphorus acquisition along the root axis - model and research methods. **Soil Biology e Biochemistry**, v. 43, n. 5, p. 883-894, 2011.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3 ed., San Diego: Academic Press. p. 651-889, 2012.

MARTINS-MIRANDA, A. S. **Atividade de enzimas relacionadas com estresses bióticos e abióticos em plântulas de feijão-de-corda [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] expostas à salinidade e deficiência hídrica.** 2002, 85 f. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) – Departamento de Bioquímica e Biologia Molecular, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

MATSUO, E.; FERREIRA, S. C.; SEDIYAMA, T. Botânica e Fenologia. In: SEDIYAMA, T. **Soja do plantio a colheita.** 22 ed., Viçosa: Editora UFV, p. 27-53, 2015.

MEOTTI, G. V.; BENIN, G.; ROSSI, R. S.; BECHE, E.; MUNARO, L. B. Épocas de semeadura e desempenho agrônômico de cultivares de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 1, p. 14-21, 2012.

MENDES, L. da S.; SOUZA, C. H. E. de; MACHADO, V. J. Adubação com silício: influência sobre o solo, planta, pragas e patógenos. **Cerrado Agrociência**, n. 2, p. 51-63, 2011.

MELO, G. W. B.; BRUNETTO, J. Z. G.; CERETTA, C. A. **Calagem, adubação e contaminação em solos cultivados com videiras.** Embrapa Uva e Vinho: Vacaria, p. 138, 2016. (Documentos, 100).

MORAES, S. R. G. Nutrição do feijoeiro e intensidade da antracnose em função da aplicação de silício e cobre. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, n. 2, p. 283-291, 2009.

MUSSUARY, R. M. Anatomia foliar de soja infectada por *Phakopsora pachyrhizi* H. Sydow & Sydow e tratadas com extratos vegetais. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 14, n. 1, p. 18-25, 2012.

NAVARINI, L.; DALLAGNOL, L. J.; BALARDIN, R. S.; MOREIRA, M. T.; MENEGHETTI, R. C.; MADALOSSO, M. G. Controle químico da ferrugem-asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) na cultura da soja. **Summa Phytopathologica**, v. 33, n. 2, p. 182-186, 2007.

NICOLINI, F.; REIS, E. M.; ZOLDAN, S. M.; DANELLI, A. L. D.; ZANATTA, M.; AVOZANI, A.; TONIN, R. B.; GARCES, F. R. . Efeito da radiação solar na germinação de uredosporos da ferrugem da soja. In: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DE FITOPATOLOGIA, **Tropical plant pathology**, 2010.

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, n. 3, p. 877-888, 2011.

OLIVEIRA, J. R. **Crescimento, produção e eficiência nutricional de genótipos de eucalipto em diferentes condições Edafoclimáticas de Minas Gerais**. 2017, 166 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

ONO, Y.; BURITICA, P.; HENNEN, J. F. Delimitation of *Phakopsora physopella* and *Cerotelium* and their species on leguminosae. **Mycological Research**, v. 96, n. 10, p. 825-850, 1992.

PASCHOLATI, S. F.; CIA, P. Uso de indutores de resistência: conceito, realidade e perspectivas. In: FANCELLI, A. I.; DOURADO NETO, D. **Milho: manejo e produtividade**. Piracicaba: USP/ESALQ/LPV, 2009.

PASCHOLATI, S. F. Fisiologia do parasitismo: como as plantas se defendem dos patógenos. In: AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIM, F. A. (Eds.) **Manual de Fitopatologia**. 4 ed., Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, p. 593-633, 2011.

PEREIRA, R. J.; CARDOSO, M. G. Metabólitos secundários vegetais e benefícios antioxidantes. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, n. 4, p. 146-152, 2012.

PES, L. Z.; ARENHARDT, M. H. **Fisiologia Vegetal**. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, Rede e-Tec Brasil, 2015. 81 p.

POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A. Manejo de doença de plantas com macro e micronutrientes. **Fitopatologia Brasileira**, v. 28, n. 1, p. 52-54, 2003.

POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A. Nutrição mineral no manejo de doenças de plantas. In: **Grupo de Estudos Avançados em Fitopatologia. Nutrição no manejo de doenças de plantas**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa: GEAFIP, 2012.

RAO, M. V.; DAVIS, K. R. The physiology of ozone-induced cell death. **Planta**, v. 213, n.5, p. 682-690, 2001.

RAY, D. K.; MUELLER N. D.; WEST, P. C.; FOLEY, J. A. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. **Plos One**, v. 8, n. 6, p.1-8, 2013

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia vegetal**. 8 ed., Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A., 2014.

REED, B. M.; RICHARDSON, P. E.; RUSSELL, C. C. Stems nematode infection of resistant and susceptible cultivars of alfafa. **Phytopathology**, v. 69, p. 993-996, 1979.

REIS, E. M.; BRESOLIN, A. C. R.; CARMONA, M. **Doenças da soja I: ferrugem-asiática**. 1. ed., Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2006. 48 p.

REIS, E. M.; REIS, A. C.; CARMONA, M.; DANELLI, A. L. D. Ferrugem-asiática. In: REIS, E. M.; CASA, R. T. (Orgs). **Doenças da soja**. Passo Fundo: Berthier, p 69-101, 2012.

REUVENI, R.; AGAPOV, V.; REUVENI, M. A foliar spray of micronutrient solutions induces local and systemic protection against powdery mildew (*Sphaerotheca fuliginia*) in cucumber plants. **European Journal of Plant Pathology**, v. 103, n. 7, p. 581-588, 1997.

REZENDE, P. M. Adubação foliar em épocas de aplicação de fósforo na cultura da soja. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 6, p. 1105-1111, 2005.

RODRIGUES, M. A. T; **Classificação de fungicida de acordo com o mecanismo de ação proposto pelo FRAC**. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – São Paulo, 2006.

RODRIGUES, F. A.; OLIVEIRA, L. A.; KORNDORFER, A. P.; KORNDORFER, G. H. Silício: um elemento benéfico e importante para as plantas. **Informações Agrônomicas**, n. 134, p. 14-20, 2011.

RHEINHEIMER, D. S.; SOUZA, R. O. Condutividade elétrica e a acidificação de águas usadas na aplicação de herbicidas no Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 30, n. 1, p. 97-104, 2000.

SAAD, M. B. W. **Avaliação técnica e econômica preliminar da produção de etanol via hidrólise enzimática de bagaço de cana-de-açúcar**. 2010, 138 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Departamento de Biotecnologia Industrial, Lorena – São Paulo, 2010.

SAKAMOTO, R. L.; SILVA JUNIOR, V. L. R.; FANCELLI, A. L. Efeitos do fosfito de Mn, fungicida e de micronutrientes, aplicados em diferentes estádios fenológicos, no controle da ferrugem-asiática e na produtividade da soja (*Glycine max.* (L.) Merrill). In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SÁNCHEZ-PARDO, B.; FERNÁNDEZ-PASCUAL, M.; ZORNOZA, P. Copper microlocalisation and changes in leaf morphology, chloroplast ultrastructure and antioxidative response in white lupin and soybean grown in copper excess. **Environmental and Experimental Botany**, v. 84, n. 1, p. 52-60, 2012.

SANTOS, T. M. D.; COSTA, M. R.; XAVIER, A. A.; NIETSCHE, S.; FERNANDES, T. P.; PEREIRA, G. V. N. Variabilidade genética de isolados de *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense obtidos de bananais do norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, n. 2, p. 437-445, 2011.

SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R. C.; BARROS, H. B. Origem, evolução e importância econômica. In: SEDIYAMA, T. (Ed.). **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Editora Mecenas, 2009. p. 1-5,

SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. **Soja: do plantio à colheita**. Viçosa: Editora UFV, 2015. p. 333.

SINDIRAÇÕES. **Compêndio brasileiro de alimentação animal**. 5 ed. Brasil, 842 p.

SCHMITZ, H. K.; MEDEIROS, C. A.; CRAIQ, I. R.; STAMMLER, G. Sensitivity of *Phakopsora pachyrhizi* towards quinone-outside-inhibitors and demethylation-inhibitors, and corresponding resistance mechanisms. **Pest Management Science**, v. 7, n.3, p. 378-388, 2014.

SCHREINER, R. P. Foliar sprays containing phosphorus (P) have minimal impact on 'Pinot Noir' growth and P status, mycorrhizal colonization, and fruit quality. **Hortscience**, v. 45, n.1, p. 815-821, 2010.

SCHUTZENDUBEL, A.; POLLE, A. Plant responses to abiotic stresses: heavy-metal induced oxidative stress and protection by mycorrhization. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 372, p. 1351-1365, 2002.

SCHWAN-ESTRADA, K. R. F.; STANGARLIN, J. R.; PASCHOLATI, S. F. Mecanismos bioquímicos de defesa vegetal. In: PASCHOLATI, S.F.; LEITE, B.; STANGARLIN, J.R.; CIA, P. **Interação planta-patógeno: fisiologia, bioquímica e biologia molecular**. Piracicaba-SP. Ed. FEALQ. v 13. 2008, p. 227-248.

STADNIK, M. Indução de resistência a oídios. In: CONGRESSO PAULISTA DE FITOPATOLOGIA, São Paulo. **Anais do Congresso Paulista de Fitopatologia**, v. 23, p. 176-181. 2000.

SMITH, C. J. Accumulation of phytoalexins: defense mechanism and stimulus response system. **The New Phytologist**, v. 132, n. 1, p. 1-45, 1996.

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**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

STANGARLIN, J. R.; KUHN, O. J.; SCHWAN-ESTRADA, K. R. F. Controle de doenças de plantas por extratos de origem vegetal. **Revisão Anual de Patologia de Plantas**, v. 16, p. 265-304, 2008.

STANGARLIN, J. R.; KUHN, O. J.; TOLEDO, M. V.; PORTZ, R. L.; SCHWAN-ESTRADA, K. R. F.; PASCHOLATI, S. F. A defesa vegetal contra fitopatógenos. **Scientia Agraria Paranaensis**. v. 10, n. 1, p. 18-46, 2011.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio Grande do Sul, 2008, p. 222.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

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

TOMAR, R. S. S; TIWARI S. VINOD. Molecular and morpho-agronomical characterization of root architecture at seedling and reproductive stages for drought tolerance in wheat. **Plos One**, v. 11, n. 6, p. 1-21, 2016.

THOMAS, A. L.; COSTA, J. A. Desenvolvimento da planta de soja e o potencial de rendimento de grãos. In: THOMAS, A. L.; COSTA, J. A. (Ed.). Soja: manejo para alta produtividade de grãos. Porto Alegre: Evangraf, 2010. p. 13-33.

TOYOTA, M. **Extratos vegetais e produtos comerciais no manejo da ferrugem e nos mecanismos de defesa do cafeeiro à cercosporiose**. 2008, 77 f. Dissertação - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

TWIZEYIMANA, M.; HARTMAN, L. Sensitivity of *Phakopsora pachyrhizi* isolates to fungicides and reduction of fungal infection based on fungicide and timing of application. **Plant Disease**, v. 101, n. 1, p. 121-182, 2017.

VITTI, G. C.; TREVISAN, W. Manejo de macro e micronutrientes, para alta produtividade da soja. **Informações Agronômicas**, n. 90, p. 16, 2000 (Encarte técnico).

YAMORI, W. Photosynthetic response to fluctuating environments and photoprotective strategies under abiotic stress. **Journal of Plant Research**, v. 129, n. 3, p. 379-395, 2016.

ZAMBOLIM, L.; VENTURA, J. A. Resistência a doenças induzida pela nutrição mineral das plantas. **Revisão Anual de Patologia de Plantas**, v.1, n.2, p. 275-318, 1993

ZANATTA, J. F.; MANFREDI-COIMBRA, S.; PROCÓPIO, S. De OLIVEIRA; MANICA-BERTO, R.; SGANZERLA, D. C.; CARNEIRO, J. C. Interações entre herbicidas e inseticidas na cultura do algodão – uma revisão. **Revista da FZVA**, v. 14, n. 2, p. 34-45, 2007.

ZAREIE, R.; MELANSON, D. L.; MURPHY, P. J. Isolation of fungal cell wall degrading proteins from barley (*Hordeum vulgare* L.) leaves infected with *Rhynchosporium secalis*. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 15, n. 10, p. 1031-1039, 2002.

ZOBIOLE, L. H. S.; OLIVEIRA, R. S.; HUBER, D. M. J.; CONSTANTIN, C. C.; OLIVEIRA, F. A.; OLIVEIRA, A. Glyphosate reduces shoot concentration of mineral nutrients in glyphosate-resistant soybeans. **Plant and Soil**, v. 328, n.1-2, p. 57-69, 2010.

WEIDENBENNER, N. H. Fungicide management does not affect the rate of genetic gain in soybean. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 6, p. 2043-2054. 2014.

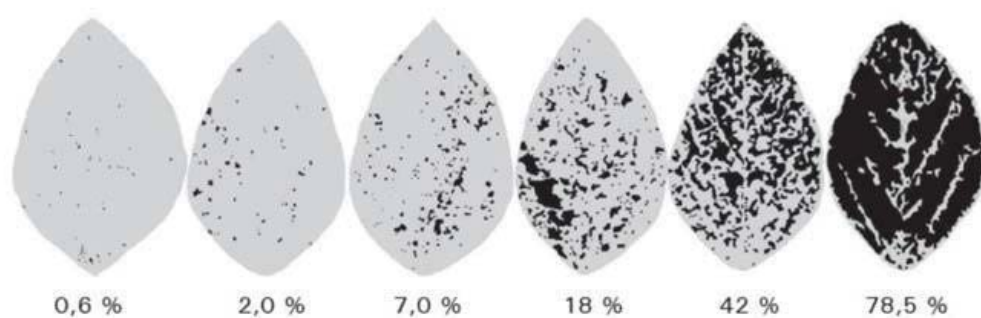
YANG, T.; POOVAIAH, B. W. Hydrogen peroxide homeostasis: Activation of plant catalase by calcium/calmodulin. **Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America**, v. 99, n. 6, p. 4097-4102, 2002.

YEH, C. C. Differential of *Phakopsora pachyrhizi*, on soybean in Taiwan. In: YORINORI, J. T.; LAZZAROTO, J. J. **Situação da Ferrugem-asiática da soja no Brasil e na América do Sul**. 1 ed. 2004, 28 p.

YRUELA, I. Copper in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**. v. 17, n. 1, p. 145-156, 2005.

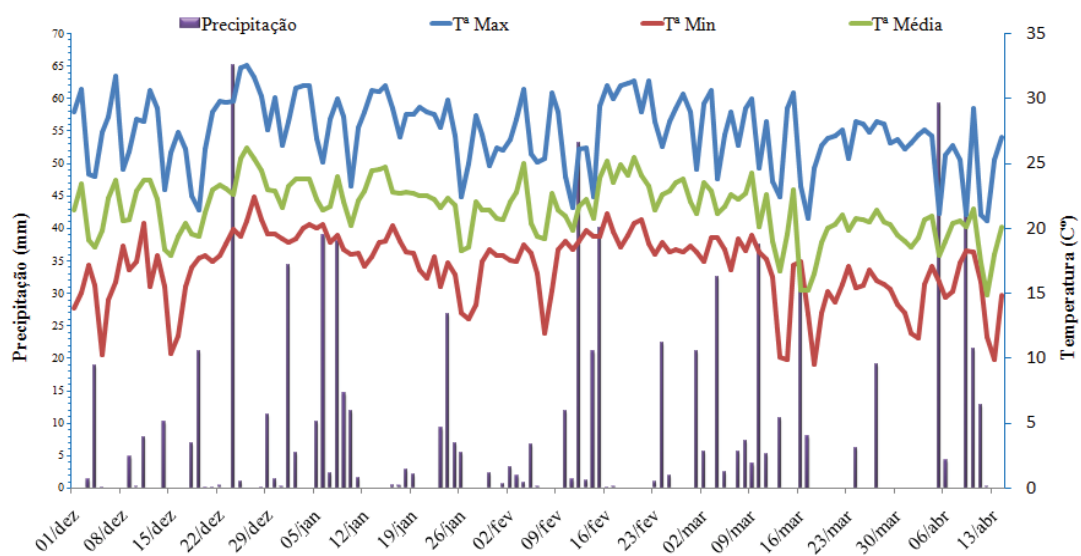
ANEXOS

Anexo I - Escala diagramática para a avaliação da severidade da ferrugem-asiática da soja (GODOY; KOGA; CANTERI, 2006)



APÊNDICES

Apêndice I - Informações climáticas de temperatura (C^a) e precipitações (mm) para Passo Fundo – RS, no período compreendido entre 01 de dezembro de 2016 a 14 de abril de 2017. Embrapa, Passo Fundo, RS, 2017



Apêndice II - Escala fenológica adaptada de Ferhr e Cavines (1977) e revisada por Ritchie et al. (1997)

| ESTÁDIO | | DESCRIÇÃO |
|---------|----------------------------------|--|
| VE | Emergência | Os cotilédones estão acima da superfície do solo |
| VC | Cotilédone | Cotilédones totalmente abertos desenvolvido |
| V1 | Primeiro nó | As folhas unifolioladas estão completamente abertas |
| V2 | Segundo nó | Primeira folha trifoliolada aberta |
| V3 | Terceiro nó | Segunda folha trifoliolada aberta |
| V(n) | Enésimo nó | “Enésimo” nó ao longo da haste principal com trifólio aberto |
| R1 | Início do florescimento | Uma flor aberta em qualquer nó da haste principal |
| R2 | Florescimento pleno | Maioria das inflorescências da haste principal com flores abertas |
| R3 | Início da frutificação | Vagens com 0,5 a 1,5 cm de comprimento no terço superior da haste principal |
| R4 | Frutificação plena | Maioria das vagens no terço superior da haste principal com comprimento de 2 a 4 cm (“canivete”) |
| R5.1 | Início da granação | Até 10% da granação máxima na maioria das vagens localizadas no terço superior da haste principal |
| R5.2 | Média granação | Maioria das vagens no terço superior da haste principal entre 10 e 25% da granação máxima |
| R5.3 | Média granação | Maioria das vagens no terço superior da haste principal com 25 a 50% da granação máxima |
| R5.4 | Média granação | Maioria das vagens no terço superior da haste principal entre 50 e 75% da granação máxima |
| R5.5 | Final da granação | Maioria das vagens no terço superior da haste principal com 75 a 100% da granação máxima |
| R6 | Semente formada 100% de granação | Maioria das vagens no terço superior contendo sementes verdes em seu ou granação plena volume máximo (“vagem gorda”) |
| R7.1 | Maturidade fisiológica | Até 50% de folhas e vagens amarelas |
| R7.2 | Maturidade fisiológica | Entre 50 e 75% de folhas e vagens amarelas |
| R7.3 | Maturidade fisiológica | Acima de 75% de folhas e vagens amarelas |
| R8.1 | Desfolha natural | Até 50% de desfolha |
| R8.2 | Desfolha natural | Acima de 50% de desfolha. Aproxima-se o ponto de colheita |
| R9 | Maturação | Maturidade a campo 95% de vagens com a cor da vagem madura |

Fonte: Adaptado de Fehr e Caviness (1977); Ritchie et al. (1982)

Apêndice III - Potencial hidrogeniônico (pH) das caldas fitossanitárias utilizadas na condução do experimento. Passo Fundo, RS, 2017

| Tratamentos | pH 1ª pulv. | pH 2ª pulv. | pH 3ª pulv. | pH 4ª pulv. |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 Testemunha | 5,21 | 6,00 | 5,85 | 5,68 |
| 2 30 g ha ⁻¹ de Óxido cuproso | 5,86 | 6,01 | 5,80 | 5,64 |
| 3 60 g ha ⁻¹ de Óxido cuproso | 7,47 | 6,04 | 5,86 | 5,67 |
| 4 90 g ha ⁻¹ de Óxido cuproso | 7,58 | 6,07 | 5,95 | 5,71 |
| 5 120 g ha ⁻¹ de Óxido cuproso | 7,64 | 6,17 | 6,09 | 5,81 |
| 6 30 g ha ⁻¹ de Carbonato de Cu | 6,88 | 6,08 | 5,95 | 5,82 |
| 7 60 g ha ⁻¹ Carbonato de Cu | 7,15 | 6,20 | 6,05 | 5,94 |
| 8 90 g ha ⁻¹ de Carbonato de Cu | 7,32 | 6,35 | 6,19 | 6,09 |
| 9 120 g ha ⁻¹ de Carbonato de Cu | 8,02 | 6,59 | 6,46 | 6,40 |

1ª pulv.: 1ª aplicação das caldas fitossanitárias; 2ª pulv.: 2ª aplicação das caldas fitossanitárias; 3ª pulv.: 3ª aplicação das caldas fitossanitárias; 4ª pulv.: 4ª aplicação das caldas fitossanitárias.

Apêndice IV - Condutividade elétrica (CE) das caldas fitossanitárias utilizadas na condução do experimento. Passo Fundo, RS, 2017

| Tratamentos | CE (μS cm) | CE (μS cm) | CE (μS cm) | CE (μS cm) |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 Testemunha | 147,3 | 111,5 | 347,0 | 132,0 |
| 2 30 g ha ⁻¹ de Óxido cuproso | 163,3 | 112,0 | 336,0 | 134,0 |
| 3 60 g ha ⁻¹ de Óxido cuproso | 179,0 | 117,4 | 348,0 | 141,0 |
| 4 90 g ha ⁻¹ de Óxido cuproso | 181,1 | 127,0 | 357,0 | 149,0 |
| 5 120 g ha ⁻¹ de Óxido cuproso | 197,7 | 149,0 | 383,0 | 172,0 |
| 6 30 g ha ⁻¹ de Carbonato de Cu | 156,0 | 130,8 | 367,0 | 150,0 |
| 7 60 g ha ⁻¹ de Carbonato de Cu | 176,8 | 145,8 | 380,0 | 165,0 |
| 8 90 g ha ⁻¹ de Carbonato de Cu | 239,0 | 186,0 | 418,0 | 134,0 |
| 9 120 g ha ⁻¹ de Carbonato de Cu | 252,0 | 230,0 | 483,0 | 272,0 |

CE: Condutividade elétrica



PPGAgro

Programa de Pós-Graduação em Agronomia

Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - FAMV