

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

TESE

Produção de Brássicas na Região Serrana do Rio de Janeiro: Relação entre Atributos de Solo, Práticas de Manejo, Hérnia das Crucíferas e Contaminação por Metais

Carlos Antônio dos Santos

2020



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA**

**PRODUÇÃO DE BRÁSSICAS NA REGIÃO SERRANA DO RIO DE
JANEIRO: RELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS DE SOLO, PRÁTICAS DE
MANEJO, HÉRNIA DAS CRUCÍFERAS E CONTAMINAÇÃO POR
METAIS**

CARLOS ANTÔNIO DOS SANTOS

Sob orientação da professora

Dr^a Margarida Goréte Ferreira do Carmo

E co-orientação do professor

Dr. Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Fitotecnia**, no Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da UFRRJ, Área de Concentração em Produção Vegetal.

Seropédica, RJ
Novembro de 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S237p

Santos, Carlos Antônio dos, 1992-
Produção de Brássicas na Região Serrana do Rio de Janeiro: Relação entre Atributos de Solo, Práticas de Manejo, Hérnia das Crucíferas e Contaminação por Metais / Carlos Antônio dos Santos. - Seropédica, 2020.
104 f.: il.

Orientadora: Margarida Goréte Ferreira do Carmo.
Coorientador: Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho.
Tese (Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Fitotecnia, 2020.

1. Brassicaceae. 2. Plasmodiophora brassicae. 3. Agricultura de montanha. 4. Cama de aviário. 5. Calagem. I. Carmo, Margarida Goréte Ferreira do, 1963, orient. II. Amaral Sobrinho, Nelson Moura Brasil do, 1953-, coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Fitotecnia. IV. Título.

“Permitida à cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA**

CARLOS ANTÔNIO DOS SANTOS

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Fitotecnia** no Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da UFRRJ, Área de concentração em Produção Vegetal.

Tese aprovada em: 09/11/2020

Conforme deliberação número 001/2020 da PROPPG, de 30/06/2020, tendo em vista a implementação de trabalho remoto e durante a vigência do período de suspensão das atividades acadêmicas presenciais, em virtude das medidas adotadas para reduzir a propagação da pandemia de Covid-19, nas versões finais das teses e dissertações as assinaturas originais dos membros da banca examinadora poderão ser substituídas por documento(s) com assinaturas eletrônicas. Estas devem ser feitas na própria folha de assinaturas, através do SIPAC, ou do Sistema Eletrônico de Informações (SEI) e neste caso a folha com a assinatura deve constar como anexo ao final da tese / dissertação.

Dra. Margarida Goréte Ferreira do Carmo. UFRRJ/IA/DFITO
(Orientadora/Presidente)

Dr. José Guilherme Marinho Guerra (Embrapa Agrobiologia)
(Membro Interno)

Dra. Fabiana Soares dos Santos (UFF)
(Membro Externo)

Dr. Marco Antonio de Almeida Leal (Embrapa Agrobiologia)
(Membro Externo)

Dr. Silvaldo Felipe da Silveira (UENF)
(Membro Externo)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

À sociedade brasileira por ter custeado integralmente minha formação profissional e todos os projetos de pesquisa e extensão dos quais participei.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e ao Curso de Pós-Graduação em Fitotecnia por todas as oportunidades, experiências e ensinamentos fornecidos.

Ao CNPq pela bolsa de doutorado concedida (Processo 140566/2017-1) e às agências de fomento FAPERJ e CAPES.

À minha orientadora, Dra. Margarida Goréte Ferreira do Carmo, e ao meu co-orientador Dr. Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho, por terem acreditado no meu trabalho. Agradeço por todo o conhecimento partilhado, conselhos e oportunidades ao longo de todos esses anos;

A todos os integrantes do Laboratório de Epidemiologia e Patologia de Sementes (LabEPS) do Departamento de Fitotecnia da UFRRJ pela parceria essencial na realização das coletas, ensaios, processamento e análises das amostras.

Ao Laboratório de Química e Poluição do Solo (LQPS) da UFRRJ pelo suporte para as coletas, processamento e análises das amostras.

Ao Laboratório de Estudos das Relações Solo-Planta (LSP) da UFRRJ e ao Departamento de Engenharia de Agronegócios da Universidade Federal Fluminense pelo suporte às análises químicas.

Agradeço aos funcionários dos Setores de Horticultura e de Grandes Culturas do Departamento de Fitotecnia da UFRRJ pelo apoio nas coletas e ensaios de campo.

Aos agricultores da Região Serrana do Rio de Janeiro pela oportunidade de realizar este estudo contextualizado e pelos inúmeros e importantes ensinamentos que nos foram compartilhados.

À banca examinadora pelas colaborações para melhoria deste trabalho.

À minha família e amigos por me encorajarem na realização desta importante etapa profissional.

Agradeço a nossa equipe e a todas as pessoas que contribuíram para o desenvolvimento deste estudo.

Muito obrigado!

BIOGRAFIA

Carlos Antônio dos Santos, filho de Margarida Conceição dos Santos e Vicente Antônio da Silva, nasceu no dia 26 de abril de 1992 na cidade de Goianésia, Goiás. Ingressou em 2008 no Instituto Federal Goiano, *Campus Ceres*, formando-se em Técnico em Agroindústria no ano de 2009. Durante o curso técnico, foi bolsista de Iniciação Científica Júnior (PIBIC Jr.), sob orientação do prof. Dr. Márcio Ramatiz Lima dos Santos. Em 2010, ingressou na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), obtendo o título de Engenheiro Agrônomo no ano de 2015. Durante a graduação, foi bolsista de Iniciação Científica (PIBIC) no Departamento de Fitotecnia da UFRRJ, sob orientação da prof^a Dr. Margarida Goréte Ferreira do Carmo, e desenvolveu atividades relacionadas a sistemas de produção de tomate sob manejo orgânico, estratégias de manejo de doenças foliares na cultura, e conservação de germoplasma de tomateiro. Realizou graduação-sanduiche na Universidad de Salamanca (Espanha) entre os anos de 2013 e 2014. Em 2015, ingressou no curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da UFRRJ (PPGF), área de concentração em Produção Vegetal. Durante esse período, estudou estratégias de manejo e redução das perdas causadas pela hérnia das crucíferas em lavouras de couve-flor em Nova Friburgo-RJ. Obteve o título de Mestre em Fitotecnia no ano de 2017, com orientação da prof^a Dra. Margarida Goréte Ferreira do Carmo, e co-orientação do prof. Dr. Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho. Em março de 2017, ingressou no curso de doutorado do PPGF da UFRRJ.

RESUMO GERAL

SANTOS, C. A. **Produção de brássicas na Região Serrana do Rio de Janeiro: Relação entre atributos de solo, práticas de manejo, hérnia das crucíferas e contaminação por metais**. 2020. 104p. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020.

As hortaliças da família Brassicaceae, exigentes em fertilidade, manejo e clima frio, apresentam grande valor nutricional e de mercado. No Estado do Rio de Janeiro, sua produção se concentra na Região Serrana, em propriedades familiares com configuração típica de agricultura de montanha em região tropical, sob manejo intensivo e com relatos de impactos ambientais e perdas de produtividade devido à ocorrência de doenças. Dentro deste contexto, desenvolveu-se o presente trabalho delineado com os seguintes objetivos: 1) Investigar os principais aspectos, práticas de manejo e problemas relacionados à produção de couve comum em região representativa para esta cultura; 2) propor e testar estratégias de manejo de solo, fitotécnico e de controle da hérnia das crucíferas para a cultura de brócolis; 3) avaliar os impactos das práticas de manejo e de insumos na qualidade das hortaliças e contaminação por metais. Inicialmente, realizaram-se coletas de amostras de solo e de plantas de couve-comum em áreas de produção familiar na região de Petrópolis, RJ, seguidas de avaliação dos atributos de solo, produção de biomassa e intensidade da hérnia das crucíferas (Capítulo I). Registraram-se falhas no manejo que podem estar colaborando para a ocorrência generalizada da doença, como o cultivo sequencial de espécies hospedeiras e a não realização de análise de solo nem de calagem. A doença foi mais severa em áreas com solos mais ácidos e com maior teor de Al^{3+} , e com maior acúmulo de água (maior Topographic Wetness Index - TWI). Em seguida, estudaram-se estratégias de manejo visando o aumento do rendimento da cultura de brócolis e a redução das perdas causadas pela hérnia das crucíferas, em dois ensaios distintos (Capítulo II). No primeiro ensaio, avaliou-se a incorporação de quatro tipos de pré-cultivos (crotalária, milho, coentro e vegetação espontânea) associada ao uso de mudas de brócolis de diferentes tamanhos. No segundo, avaliou-se o uso de corretivos, calcário e escória de siderurgia, associado à aplicação de esterco de “cama” de aviário, fresca ou compostada por 45 dias. A incorporação da biomassa da crotalária e do coentro e a utilização de mudas maiores (célula de 35 cm³ e idade de 28 dias e célula de 50 cm³ e idade de 32 dias), resultaram em menor intensidade da doença, maior desenvolvimento das plantas e produtividade. A aplicação de “cama” de aviário aumentou a intensidade da doença, mas não afetou a produtividade. A aplicação de escória de siderurgia não diferiu do calcário quanto à correção da acidez e desenvolvimento das plantas. No Capítulo III, foi analisada a contaminação de plantas de brócolis por metais em função do uso da escória de siderurgia e da cama de aviário. Determinaram-se os teores, translocação e acúmulo de metais, e riscos à saúde humana associados ao consumo das inflorescências produzidas. Os metais Pb e Cd foram os que mais colaboram para os riscos não-carcinogênicos à saúde. Nas inflorescências acumularam-se 60 a 66% de todo o Pb absorvido ao se utilizar, simultaneamente, escória e cama de aviário fresca ou compostada. Com base nos índices calculados foi possível concluir que o consumo de inflorescências produzidas com o uso combinado destes insumos pode resultar em riscos a saúde.

Palavras-chave: Brassicaceae. *Plasmodiophora brassicae*. Agricultura de montanha.

GERAL ABSTRACT

SANTOS, C. A. **Brassica production in the mountainous region of Rio de Janeiro: relationship between soil attributes, agricultural management practices, clubroot, and metal contamination.** 2020. 104p. Thesis (PhD Degree in Plant Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020.

The vegetables of the Brassicaceae family, demanding in soil fertility, management, and cold climate, have great nutritional and market value. In the State of Rio de Janeiro, its production is concentrated in the mountainous region, on family properties under intensive management, with a typical configuration of mountain agriculture in a tropical region and with reports of environmental impacts and productivity losses due to the occurrence of diseases. Within this context, the present work was developed with the following objectives: 1) Investigate the main aspects, management practices and problems related to the production of kale in a representative region for this crop; 2) to propose and test strategies for soil management, phytotechnics and control of clubroot in the culture of broccoli; 3) to assess the impacts of management practices and inputs on vegetable quality and metal contamination. Initially, samples of soil and kale plants were collected in areas of family production in the region of Petrópolis, RJ, followed by the evaluation of soil attributes, biomass production and intensity of clubroot (Chapter I). There were failures in management that may be contributing to the widespread occurrence of the disease, such as the sequential cultivation of host species and failures in carrying out soil analysis and liming. The disease was more severe in areas with more acidic soils and higher Al^{3+} content, and water accumulation (greater Topographic Wetness Index - TWI). In Chapter II, management strategies were evaluated to increase the yield of the broccoli culture and reduce the losses caused by clubroot. In the first trial, the incorporation of four types of pre-cultivations (green manure), associated with the use of broccoli seedlings of different sizes, was evaluated. In the second trial, the use of corrective, limestone and steel slag associated with the application of poultry litter, fresh or composted for 45 days, was evaluated. The incorporation of sunn hemp and coriander biomass, and the use of larger seedlings (cell of 35 cm³ and age of 28 days) and (cell of 50 cm³ and age of 32 days), resulted in less intensity of the disease, and greater development of plants and yield. The application of poultry litter increased the intensity of the disease but did not affect the production of broccoli. The application of steel slag did not differ from limestone in correcting acidity and plant development. In Chapter III, the contamination of broccoli plants by toxic metals was analyzed due to the use of steel slag and poultry litter. The levels, translocation and accumulation of metals, and risks to human health associated with the consumption of the produced inflorescences were determined. The metals Pb and Cd were the ones that most collaborate for the non-carcinogenic health risks. In the inflorescences was accumulated 60 to 66% of all absorbed Pb when using steel slag and fresh or composted poultry litter, simultaneously. Based on the calculated indices, it was concluded that the consumption of inflorescences produced with the combined use of these inputs can result in health risks.

Keywords: Brassicaceae. *Plasmodiophora brassicae*. Mountain agriculture.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Lavouras de produção de couve-comum (*Brassica oleracea* var. *acephala*) na Região Serrana do Rio de Janeiro. Petrópolis, RJ, 2020. 25
- Figura 2.** Pontos amostrados em lavouras de produção de couve-comum (*Brassica oleracea* var. *acephala*) na Região Serrana do Rio de Janeiro. Petrópolis, RJ, 2020. 26
- Figura 3.** Resultado da pesquisa com produtores em 24 áreas de produção de couve-comum (*Brassica oleracea* var. *acephala*) da região de Petrópolis-RJ (Brasil), com dados expressos em porcentagem das unidades produtivas amostradas, sendo: a) culturas antecessoras a couve-comum; b) realização de limpeza dos tratores e implementos utilizados na lavoura; c) realização de análise de solo na área; d) realização de calagem na área; e) épocas de aplicação de cama de aviário; f) destino dos restos culturais. 29
- Figura 4.** Análise de componentes principais (ACP) relativas à intensidade da hérnia das crucíferas (*Plasmodiophora brassicae*) em couve-comum (*Brassica oleracea* var. *acephala*). (a): porcentagem de hérnias nas raízes (PVRH) x atributos do solo [pH, teores de cálcio (Ca) e alumínio (Al) trocáveis, e matéria orgânica (MO)] x índice de fluxo de drenagem (TWI); (b): massa fresca das hérnias nas raízes (MFRH) x teores de alumínio (AlR), cálcio (CaR), magnésio (MgR), potássio (KR) e fósforo (PR) nas raízes. 32
- Figura 5.** Dendrograma relacionado à análise de agrupamento dos pontos amostrados com base nos atributos de fertilidade do solo e estabelecido por meio da distância Euclidiana e método de Ward... 33
- Figura 6.** Médias padronizadas para atributos relacionados à fertilidade do solo [pH em água, cálcio (Ca) e alumínio (Al) trocáveis, acidez potencial (H+Al), e saturação por bases (V%)]; relevo [declividade (Slope) e índice de fluxo de drenagem (TWI)]; porcentagem de galhas da hérnia das crucíferas causada por *Plasmodiophora brassicae* nas raízes (PVRH); massa seca das plantas (MSPL); teores de cálcio (CaR), magnésio (MgR), fósforo (PR), e potássio nas raízes (KR); acúmulo de alumínio nas raízes (AlAR) e acúmulo de cálcio (CaAPL), magnésio (MgAPL), fósforo (PAPL), e potássio (KAPL) nas plantas; considerando-se os 3 grupos (G1, G2 e G3) formados a partir da análise de agrupamento das amostras coletadas em áreas de produção de couve-comum..... 34
- Figura 7.** Pré-cultivo (A) e incorporação (B) de coentro, crotalária, milho e vegetação espontânea, utilizados como cultivos antecessores; quatro tamanhos de mudas de brócolis americano cv. Avenger (C) (da direita para a esquerda: Tamanho 1 - célula de 10 cm³ e idade de 20 dias; Tamanho 2 - célula de 16 cm³ e idade de 24 dias; Tamanho 3 - célula de 35 cm³ e idade de 28 dias; Tamanho 4 - célula de 50 cm³ e idade de 32 dias); avaliação e colheita das inflorescências (D) em ensaio realizado em condições de campo no período de novembro de 2017 a maio de 2018 em Petrópolis, RJ. Seropédica, UFRRJ, 2020. 45
- Figura 8.** Exemplo de parcela experimental contendo subparcelas, parcela útil (em branco) e bordaduras das subparcelas (em cinza). Seropédica, UFRRJ, 2020. 46
- Figura 9.** Aplicação de corretivos (A); compostagem de cama de aviário por 45 dias (B); transplântio das mudas de brócolis cv. Avenger (C); e condução do cultivo a campo (D) em Petrópolis, RJ, de março a junho de 2018. Seropédica, UFRRJ, 2020. 48
- Figura 10.** Registros diários de temperatura e umidade relativa (máximas, médias e mínimas) e precipitação durante o ciclo do brócolis no período compreendido entre fevereiro e maio de 2018 em Petrópolis-RJ. 50
- Figura 11.** Registros diários de temperatura e umidade relativa (máximas, médias e mínimas) e precipitação durante o ciclo do brócolis em período compreendido de março a junho de 2018 em Petrópolis-RJ. 53
- Figura 12.** Teores de Pb (a), Cd (b), Cu (c), Fe (d), Mn (e) e Zn (f) nas raízes, caule, folhas e inflorescências de plantas de brócolis em função da aplicação isolada de calcário e escória de siderurgia e de sua aplicação combinada com cama de aviário fresca (CAF) e compostada por 45 dias (CAC). 72

Figura 13. Porcentagem de Pb (a), Cd (b), Cu (c), Fe (d), Mn (e) e Zn (f) translocados para a parte aérea de plantas de brócolis, caule, folhas e inflorescência, em função da aplicação de calcário e escória de siderurgia isoladamente e combinada com a aplicação de cama de aviário fresca (CAF) ou compostada por 45 dias (CAC). 74

Figura 14. Valores acumulados de Pb (a), Cd (b), Cu (c), Fe (d), Mn (e) e Zn (f) nas raízes, caule, folhas, inflorescências e total em plantas de brócolis em função da aplicação de calcário e escória de siderurgia isoladamente e combinada com a aplicação de cama de aviário fresca (CAF) ou compostada por 45 dias (CAC).. 75

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Média, desvio padrão (DP), e valores mínimos e máximos de pH, teores trocáveis de Ca, Mg, e K no solo, acidez potencial (H+Al), capacidade de troca catiônica (CTC), teor assimilável de P, saturação por bases (V) e matéria orgânica (MO) referentes às amostras coletadas em 24 áreas de produção de couve-comum. 31
- Tabela 2.** Médias e desvios referentes às variáveis número de folhas (unidades), altura (cm), área foliar (cm²), massa fresca e seca da parte aérea (cm); e volume (cm³), comprimento (cm), massa fresca e seca (g) de raiz de quatro diferentes tamanhos de mudas (Tamanho 1 = célula de 10 cm³ e idade de 20 dias; Tamanho 2 = célula de 16 cm³ e idade de 24 dias; Tamanho 3 = célula de 35 cm³ e idade de 28 dias; Tamanho 4 = célula de 50 cm³ e idade de 32 dias). Seropédica, UFRRJ, 2020. 46
- Tabela 3.** Caracterização dos pré-cultivos (milho, coentro, crotalária e vegetação espontânea) e estimativa da quantidade de biomassa fresca e seca (Mg ha⁻¹) e de nutrientes incorporados ao solo 12 dias antes do transplântio das mudas de brócolis. 49
- Tabela 4.** Atributos químicos do solo na ocasião do transplântio das mudas de brócolis, 12 dias após a roçagem e incorporação dos resíduos das plantas antecessoras (milho, coentro, crotalária e vegetação espontânea). 50
- Tabela 5.** Efeito de pré-cultivos e incorporação da biomassa fresca de milho, coentro, crotalária e vegetação espontânea, e do tamanho de mudas de brócolis (Tamanho 1 = célula de 10 cm³ e idade de 20 dias; Tamanho 2 = célula de 16 cm³ e idade de 24 dias; Tamanho 3 = célula de 35 cm³ e idade de 28 dias; Tamanho 4 = célula de 50 cm³ e idade de 32 dias) sobre a severidade da hérnia das crucíferas (causada por *Plasmodiophora brassicae*), porcentagem de hérnias nas raízes (PMFRH), volume de raiz sadia (mL), massa seca total das raízes e da planta (g), massa fresca (g) e diâmetro (cm) das inflorescências e produtividade estimada (Mg ha⁻¹). 51
- Tabela 6.** Efeito de pré-cultivos e incorporação de biomassa fresca de plantas de milho, coentro, crotalária e vegetação espontânea, e do tamanho de mudas de brócolis (Tamanho 1 = célula de 10 cm³ e idade de 20 dias; Tamanho 2 = célula de 16 cm³ e idade de 24 dias; Tamanho 3 = célula de 35 cm³ e idade de 28 dias; Tamanho 4 = célula de 50 cm³ e idade de 32 dias) sobre a relação carbono / nitrogênio (C/N), teores médios de N e S, e acúmulo de N, S, Ca, Mg, P e K em plantas de brócolis. 52
- Tabela 7.** Efeito da aplicação de calcário (PRNT = 91,26%; CaO = 39%; MgO = 11,0%) e escória de siderurgia (Ca = 25,0%, Mg = 6,0%, Si = 10,5%), e cama de aviário fresca (não compostada), compostada por 45 dias e testemunha (controle) sobre a severidade da hérnia das crucíferas, causada por *Plasmodiophora brassicae*, porcentagem de hérnias nas raízes (PMFRH) volume de raiz sadia (mL), massa seca total das raízes e da planta (g), massa fresca (g) e diâmetro (cm) das inflorescências e produtividade de brócolis. 54
- Tabela 8.** Efeito da aplicação de calcário (PRNT = 91,26%; CaO = 39%; MgO = 11,0%) e escória de siderurgia (Ca = 25,0%, Mg = 6,0%, Si = 10,5%), e cama de aviário fresca (não compostada), compostada por 45 dias e testemunha (controle) sobre a relação carbono / nitrogênio (C/N), teores médios de N e S, e acúmulo de N, S, Ca, Mg, P e K em plantas de brócolis. 54
- Tabela 9.** Teores pseudototais e biodisponíveis de Pb, Cd, Cu, Mn e Zn (mg kg⁻¹) no solo antes da aplicação dos corretivos (teores iniciais) e aos 87 dias após a aplicação de calcário e escória de siderurgia. 70
- Tabela 10.** Teores de Pb, Cd, Cu, Fe, Mn e Zn nas inflorescências *in natura* de brócolis (mg kg⁻¹ massa fresca) cultivado com a utilização de calcário ou escória de siderurgia combinados à cama de aviário fresca (CAF) ou compostada (CAC); dose oral de referência; valores estimados de ingestão diária (IDE), expresso em mg kg⁻¹ de peso corporal (p.c.) dia; e coeficiente de risco-alvo (THQ), considerando-se indivíduos adultos e crianças. 78
- Tabela 11.** Índice total de perigo (ITP) para indivíduos adultos e crianças, considerando-se somatório dos coeficientes de risco-alvo de todos os metais, e fator de risco cancerígeno (FRC) em função da exposição a Pb. 79

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

- AlAR – Alumínio acumulado nas raízes
- AlR – Teor de alumínio nas raízes
- ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária
- AT – Tempo médio para agentes cancerígenos
- B_w – Peso corporal médio de um adulto
- C/N – Relação carbono/nitrogênio
- CaAPL – Cálcio total acumulado nas plantas
- CAC – Cama de aviário compostada por 45 dias
- CAF – Cama de aviário fresca (sem compostagem)
- CaR – Teor de cálcio nas raízes
- CE – Condutividade elétrica
- C_{metal} – Concentração de metal nas inflorescências *in natura*
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- Corg. – Carbono orgânico total
- CSFo – Fator oral de segurança dos contaminantes
- CTC – Capacidade de troca catiônica
- CV – Coeficiente de variação
- DAC – Dias após a aplicação dos corretivos
- DAS – Dias após a semeadura
- DAT – Dias após o transplante das mudas
- DOR – Dose oral de referência
- DP – Desvio padrão
- ED – Duração da exposição
- E_{Fr} – Frequência da exposição
- FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
- FRC – Fator de risco cancerígeno
- H + Al – Acidez potencial
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ICP-OES – Espectrofotômetro de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado
- IDE – Ingestão diária estimada
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
- IT – Índice de translocação
- ITP – Índice total de perigo

KAPL – Potássio total acumulado nas plantas
KR – Teor de potássio nas raízes
LD – Limite de determinação de metais
LQ – Limite de quantificação de metais
MFRH – Massa fresca das hérnias nas raízes
MFRS – Massa fresca da fração sadia da raiz
MgAPL – Magnésio total acumulado nas plantas
MgR – Teor de magnésio nas raízes
MO – Teor de matéria orgânica no solo
MSPL – Massa seca total da planta
NIST – National Institute of Standards and Technology
PAPL – Fósforo total acumulado nas plantas
PCA – Análise de componentes principais
PL – Planta
PPT – Precipitação pluviométrica
PR – Teor de fósforo nas raízes
PRNT – Poder relativo de neutralização total
PMFRH – Porcentagem de hérnias nas raízes com base na massa fresca
PVRH – Porcentagem de hérnias nas raízes com base no volume
Slope – Declividade
TACO – Tabela Brasileira de Composição de Alimentos
THQ – Coeficiente de risco alvo não-cancerígeno
T_{máx} – Temperatura máxima
T_{méd} – Temperatura média
T_{min} – Temperatura mínima
TWI – Índice de fluxo de drenagem
UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
USEPA – United States Environmental Protection Agency
UTM – Universal Transversa de Mercator
V – Saturação por bases
VH – Volume das hérnias nas raízes
VRS – Volume da fração sadia da raiz
VTR – Volume total da raiz
W_{food} – Quantidade do alimento ingerida diariamente

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Aspectos gerais e importância das brássicas	3
2.2 Produção de hortaliças na Região Serrana do Rio de Janeiro	4
2.3 Hérnia das crucíferas	5
2.3.1 Histórico e importância da doença	5
2.3.2 Aspectos gerais sobre a doença	6
2.3.3 Manejo visando redução da hérnia das crucíferas	8
2.3.4 Interação entre <i>Plasmodiophora brassicae</i> e plantas hospedeiras e não-hospedeiras.....	10
2.3.5 Correção da acidez do solo no manejo da hérnia das crucíferas e produção de <i>Brassica</i> spp.	11
2.3.6 Uso de compostos orgânicos no manejo da hérnia das crucíferas.....	12
2.3.7 Cama de aviário, sua compostagem, e seus efeitos na severidade da hérnia das crucíferas e desenvolvimento de <i>Brassica</i> spp.	14
2.4 Contaminação de hortaliças por metais	15
2.4.1 Metais pesados.....	15
2.4.2 Influência dos insumos agrícolas no aporte de metais nos agroecossistemas	17
2.4.3 Impactos dos metais na saúde humana	17
CAPÍTULO I	20
RELAÇÃO ENTRE PRÁTICAS DE MANEJO E ATRIBUTOS DO SOLO COM A OCORRÊNCIA DA HÉRNIA DAS CRUCÍFERAS EM COUVE-COMUM	20
RESUMO	21
3. INTRODUÇÃO	23
4. MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1 Área de estudo	25
4.2 Levantamento das práticas de manejo adotadas nas lavouras de couve-comum.....	25
4.3 Coleta, avaliações e processamento de amostras de couve-comum e de solo.....	26
4.4 Análise dos dados	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1 Manejo da couve-comum	28
5.2 Ocorrência da hérnia das crucíferas e características gerais dos atributos do solo.....	30
5.3 Intensidade da hérnia das crucíferas x atributos do solo e relevo.....	31
6. CONCLUSÕES	37
CAPÍTULO II	38
ESTRATÉGIAS PARA O CONTROLE DA HÉRNIA DAS CRUCÍFERAS E PRODUÇÃO DE BRÓCOLIS EM REGIÕES TROPICAIS DE AGRICULTURA DE MONTANHA	38
RESUMO	39
7. INTRODUÇÃO	41
8. MATERIAL E MÉTODOS	44
8.1 Adubação verde e tamanho de mudas	44
8.2 Correção de acidez e adubação com cama de aviário.....	47
9. RESULTADOS	49
9.1 Adubação verde e tamanho de mudas	49
9.2 Correção de acidez e adubação com cama de aviário.....	52
10. DISCUSSÃO	55
11. CONCLUSÕES	59
CAPÍTULO III	60
METAIS TÓXICOS EM BRÓCOLIS PELO USO COMBINADO DE CORRETIVOS DA ACIDEZ E CAMA DE AVIÁRIO EM CONDIÇÕES TROPICAIS DE MONTANHA	60
RESUMO	61
12. INTRODUÇÃO	63
13. MATERIAL E MÉTODOS	65
13.1 Condições de realização do ensaio e insumos utilizados.....	65

13.2	Transplântio e condução da cultura	66
13.3	Análise do solo e caracterização química dos insumos	66
13.4	Análise dos tecidos vegetais e determinação dos teores, translocação e acúmulo de metais	67
13.5	Análise estatística	67
13.6	Avaliação dos riscos à saúde humana.....	67
14.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
14.1	Caracterização dos insumos e aporte de metais no solo	69
14.2	Escória de siderurgia x calcário e os atributos químicos do solo e teores pseudototais e biodisponíveis de metais.....	69
14.3	Teores, translocação e acúmulo de metais nas plantas de brócolis	70
14.4	Riscos à saúde humana	76
15.	CONCLUSÕES	81
16.	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	82
17	REFERÊNCIAS	83
18	APÊNDICES.....	100
18.1	Apêndice A - Questionário para coleta de couve-comum na região Serrana Fluminense... ..	100
18.2	Apêndice B - Limite de detecção e de quantificação dos metais Cd, Cu, Fe, Mn, Pb e Zn	104
18.3	Apêndice C – Teores e estimativa de aporte de metais nos insumos.	104

1. INTRODUÇÃO GERAL

A família Brassicaceae (=Cruciferae) apresenta diversas espécies de hortaliças de importância para a agricultura mundial. Dentre estas, está a *Brassica oleracea* L., amplamente cultivada no mundo todo e que apresenta diferentes variedades botânicas como o brócolis (*Brassica oleracea* L. var. *italica*), e a couve-comum, também conhecida como couve de folha ou couve manteiga (*B. oleracea* var. *acephala*). O cultivo destas hortaliças apresenta elevada importância econômica e social pela geração de empregos diretos e indiretos.

O Estado do Rio de Janeiro se destaca como um dos maiores produtores nacionais de brássicas. Esta produção se concentra na região Serrana, destacando-se os cultivos de couve-flor, brócolis e de couve-comum (IBGE, 2017). O cultivo na região é feito por pequenos agricultores, em áreas de relevo declivoso e solos ácidos, sob manejo intensivo, alto aporte de insumos e pouca diversificação das espécies cultivadas. Atualmente, o principal desafio a ser superado na região é a hérnia das crucíferas, uma doença de importância mundial causada por *Plasmodiophora brassicae* Woronin, protozoário habitante do solo e fitoparasita obrigatório.

A hérnia das crucíferas pode ser influenciada pelas características físicas, químicas e biológicas do solo. Dentre os fatores mais frequentemente relacionados à doença estão o pH do solo e a disponibilidade de cálcio e boro, sendo a doença mais severa em solos ácidos, com baixos teores destes nutrientes, e solos úmidos (DIXON, 2009a,b). A maior parte das informações sobre este patossistema são oriundas de pesquisas conduzidas em regiões de clima temperado. Com isso, existem muitas lacunas no conhecimento acerca desta doença em regiões tropicais, especialmente em áreas de agricultura de montanha.

O controle da hérnia das crucíferas é complexo e envolve uma série de medidas de caráter preventivo. A correção da acidez do solo é essencial e visa não só a redução da doença como o aumento da produtividade de *Brassica* spp. (FILGUEIRA, 2008; SANTOS et al., 2020a). Esta correção, feita tradicionalmente com a aplicação de calcário, vem sendo feita também com outros materiais, como a escória de siderurgia. A escória de siderurgia, composta por silicatos de cálcio e de magnésio principalmente, é um resíduo abundante originário da produção de aço e de baixo custo. Apesar do crescente uso deste resíduo em substituição ao calcário, inexiste informações sobre os seus efeitos no crescimento de brássicas, na redução dos danos causados pela hérnia das crucíferas e na contaminação dos solos e destas hortaliças por metais tóxicos.

O cultivo sequencial ou intensificado de brássicas favorece o aumento de esporos de resistência de *P. brassicae* no solo e as perdas pela hérnia das crucíferas (DIXON, 2009a,b). Estudos prévios (FRIBERG et al., 2006; HASSE et al., 2007; HWANG et al., 2015) apontam que a rotação de culturas com espécies não-hospedeiras pode reduzir a severidade da doença em cultivos subsequentes de brássicas. O uso de pré-cultivos para adubação verde, prática benéfica por promover a ciclagem de nutrientes e elevar o nível de matéria orgânica no solo, pode também ser uma estratégia no manejo da doença dependendo da espécie utilizada. Com isso, o conhecimento destas interações é importante para programação de rotação de culturas visando o manejo da doença e incrementos na produtividade de *Brassica* spp.

A adição de compostos e adubos orgânicos ao solo também é abordada na literatura como fator relacionado à ocorrência da doença, porém, com resultados variáveis (NIWA et al., 2007; PENALBER, 2009; BHERING et al., 2017; LIMA, 2019). Existem muitos fatores envolvidos como a fonte e a quantidade de matéria orgânica, nível de compostagem, composição química, características iniciais do solo, época de aplicação, dentre outras. O esterco de “cama” de aviário tem sido o resíduo orgânico majoritariamente utilizado nas principais regiões produtoras de brássicas e outras hortaliças no Estado do Rio de Janeiro.

Este material apesar de ser rico em nutrientes, também possui metais tóxicos ou potencialmente tóxicos em sua constituição que podem resultar em contaminação do ambiente e dos alimentos produzidos. Pouco se conhece, porém, sobre os seus efeitos no desenvolvimento da hérnia das crucíferas e na qualidade das inflorescências produzidas.

Com isso, desenvolveu-se o presente trabalho de tese considerando-se as seguintes hipóteses científicas: a) o manejo agrícola e fatores do solo e relevo influenciam na ocorrência da hérnia das crucíferas em couve-comum em áreas de agricultura de montanha; b) uso de pré-cultivos, de mudas de maior tamanho, corretivos de solo e compostos orgânicos reduzem as perdas causadas pela hérnia das crucíferas; c) insumos agrícolas utilizados na produção de brócolis influenciam na sua contaminação por metais e redução de sua qualidade como alimento.

Para testar e validar estas hipóteses, o presente estudo foi estruturado em três capítulos e teve como objetivos:

- 1) Investigar os principais aspectos, práticas de manejo do solo e da couve-comum relacionados à ocorrência da hérnia das crucíferas em região representativa para esta cultura;
- 2) Propor e testar estratégias de manejo de solo, fitotécnico e de controle da hérnia das crucíferas para a cultura de brócolis: pré-cultivos, aumento do tamanho das mudas, uso de compostos orgânicos e de corretivos de acidez.
- 3) Avaliar os impactos das práticas de manejo e de insumos na qualidade das hortaliças e contaminação por metais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais e importância das brássicas

As brássicas, nomenclatura dada às plantas da família Brassicaceae (=Cruciferae), são representadas por diversas espécies de importância econômica, social, e nutricional para a humanidade. Estas plantas são amplamente utilizadas na alimentação humana, animal, e também destinadas à produção de óleos comestíveis e industriais (RAHMAN et al., 2018; MELO et al., 2019; UGRENOVIĆ et al., 2019). No geral, crescem rapidamente e produzem grande quantidade de biomassa, além de proporcionarem boa cobertura do solo e apresentarem alta eficiência na absorção de nutrientes (UGRENOVIĆ et al., 2019).

Dentre as diferentes espécies da família Brassicaceae está *Brassica oleracea*, que é subdividida em diferentes variedades botânicas. Este é um conjunto de hortaliças muito importante para a alimentação humana e ocupa lugar proeminente na olericultura do centro-sul do Brasil (FILGUEIRA, 2008; MELO et al., 2019). Dentre as principais variedades botânicas de *B. oleracea* estão a couve-comum (*B. oleracea* var. *acephala*), brócolis (*B. oleracea* var. *italica*), couve-flor (*B. oleracea* var. *botrytis*) e o repolho (*B. oleracea* var. *capitata*). A espécie *B. oleracea* é originária de região localizada ao longo da Costa do Mediterrâneo, de onde se espalhou por toda a Europa. Dentre as diversas hipóteses, acredita-se, como a mais provável, que as diferentes variedades botânicas de *B. oleracea* hoje cultivadas derivam de *B. oleracea* var. *silvestris*, cujas plantas são semelhantes às de couve-comum. Plantas de couve silvestre vegetam espontaneamente na região de origem (MAY et al., 2007; FILGUEIRA, 2008; MELO, 2015; MELO et al., 2019; SANTOS et al., 2020a,b).

De acordo com dados da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), no ano de 2018 foram produzidas mundialmente 26.504.006 Mg de brócolis e couve-flor, em área de 1.417.806 ha e com rendimento médio de 18,62 Mg ha⁻¹ (FAOSTAT, 2019). Estimativas recentes apontam que a América do Sul produz cerca de 10% do brócolis consumido no mundo, destacando-se o Brasil como o maior produtor nesta região (SANTOS et al., 2020b). O consumo de brássicas como a couve-comum, brócolis, couve-flor e repolho tem sido associado à dietas saudáveis e equilibradas por serem hortaliças de baixo valor calórico, ricas em fibras, e com grandes quantidades de substâncias benéficas, como vitaminas (A, C, e E) e minerais como cálcio, fósforo e ferro (MAY et al., 2007; KUMAR et al., 2014; MELO, 2015; TRANI et al., 2015). O seu consumo está ainda associado aos benefícios nutracêuticos decorrentes de substâncias como os glucosinolatos (TRAKA et al., 2016).

A produção nacional de brócolis foi de 150.017 Mg, distribuídas em 23.574 unidades produtivas com destaque para os Estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro e Paraná. A produção nacional de couve-comum foi de 161.986 Mg, em 71.729 unidades produtivas localizadas, principalmente, nos Estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais (IBGE, 2017).

No Estado do Rio de Janeiro, segundo dados da EMATER-RJ (2019), a produção de brócolis é realizada em área de 1.298 hectares, com produção de 25.767 Mg e rendimento médio de 19,87 Mg ha⁻¹. Já a produção de couve-comum é feita em área de 763,93 ha, com produção de 37.484 Mg e produtividade média de 49,07 Mg ha⁻¹. O faturamento bruto obtido com estas duas culturas no Estado do Rio de Janeiro foi superior a R\$ 153.578.323 (EMATER-RJ, 2019). Dentre as áreas de produção estadual, destaca-se a Região Serrana como a principal provedora destas hortaliças, especialmente os municípios de Nova Friburgo, Teresópolis, Sumidouro e Petrópolis (EMATER-RJ, 2019).

As plantas destas hortaliças são muito semelhantes morfológicamente na sua fase inicial e vão adquirindo características distintas como seu desenvolvimento. As plantas de brócolis se assemelham às de couve-flor, porém com caule relativamente mais longo, nervuras foliares menos salientes e pedúnculos compridos e mais distanciados (MELO, 2015). O brócolis pode apresentar dois tipos de inflorescências: a do tipo ramoso com múltiplas e pequenas inflorescências e a do tipo americano com inflorescência central e única, similar à de couve-flor (MELO, 2015; SANTOS et al., 2020c). As plantas de couve-comum apresentam porte ereto, crescimento indeterminado e emissão contínua de folhas que são colhidas durante vários meses, com ciclo médio variando de 6 a 12 meses (GRISEL & ASSIS, 2015; TRANI et al., 2015). Apesar de poder ser propagada por sementes, assim como o brócolis e a couve-flor (MAY et al., 2007; MELO, 2015), a couve-comum é mais frequentemente propagada de forma vegetativa utilizando-se as brotações laterais (FILGUEIRA, 2008; TRANI et al., 2015).

Estas hortaliças, originárias de região de clima temperado, são típicas de inverno e requerem temperaturas amenas para o seu adequado desenvolvimento. Para a maioria das cultivares de brócolis, as temperaturas ideais oscilam entre 15 a 24° C (MELO, 2015). Já a couve-comum é uma hortaliça típica de outono-inverno com melhor desenvolvimento e produção sob temperaturas médias de 16 e 22 °C, mínimas de 5 a 10 °C e máxima de 28 °C (TRANI et al., 2015).

O cultivo de hortaliças da espécie *B. oleracea* requer solos férteis, com pH próximo a 6,5, e saturação por bases (V%) próximo ou superior a 80% (MAY et al., 2007; KUMAR et al. 2014; MELO, 2015; TRANI et al., 2015). Suas plantas são responsivas à adubação orgânica que pode substituir, parcialmente ou integralmente, a adubação mineral (GUERRA et al., 2013). Como as principais áreas de produção de *B. oleracea* no Brasil apresentam solos ácidos e com baixos teores de matéria orgânica e de nutrientes (BHERING et al., 2017; SANTOS et al., 2017; SANTOS et al., 2020a), a calagem e a aplicação de fertilizantes orgânicos e minerais são necessárias com vistas à obtenção de rendimentos satisfatórios (MAY et al., 2007; MELO, 2015; TRANI et al., 2015; SANTOS et al., 2020a).

As brássicas, no geral, estão sujeitas ao ataque de várias pragas e doenças que podem comprometer a produtividade e a qualidade do produto final. Dentre as pragas predominam os insetos sugadores de seiva (pulgões e a mosca-branca) e diversas espécies de lagartas (FILGUEIRA, 2008; MELO, 2015). Dentre as doenças, destacam-se hémria das crucíferas (*Plasmodiophora brassicae*) (MAY et al., 2007; FILGUEIRA, 2008; DIXON, 2009a,b; DIXON, 2014); podridão negra (*Xanthomonas campestris* pv. *campestris*); podridão-mole (*Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*); mancha de alternaria (*Alternaria brassicae*); e míldio (*Peronospora parasitica*) (MAY et al., 2007; FILGUEIRA, 2008).

2.2 Produção de hortaliças na Região Serrana do Rio de Janeiro

A Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro é uma das principais áreas de produção de hortaliças do país, sendo responsável pelo abastecimento da região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro e grande parte da região sudeste do Brasil (GRISEL & ASSIS, 2012; GRISEL & ASSIS, 2015; IBGE, 2017; LIMA et al., 2018). Esta região é referência nacional no cultivo e fornecimento de brássicas, hortaliças folhosas e tomate de mesa (GRISEL & ASSIS, 2012; BHERING et al., 2017; IBGE, 2017; EMATER-RJ, 2019).

O clima da região é propício ao cultivo de diferentes espécies hortícolas durante todo o ano, com destaque para o cultivo de espécies exigentes em frio no inverno, e de espécies exigentes em temperaturas amenas no verão. A temperatura média anual é de 18,8°C, sendo fevereiro o mês mais quente (22,1 °C) e julho o mês mais frio (15,2 °C). Já a precipitação média anual é de 1808 mm com maior concentração de chuvas durante o verão (GRISEL &

ASSIS, 2012; GRISEL & ASSIS, 2015; ASSIS & AQUINO, 2018). Estas condições climáticas são favoráveis ao cultivo de brássicas como a couve-flor, couve-comum e o brócolis, que são hortaliças representativas do modelo de agricultura adotado nessa região montanhosa (BHERING et al., 2017; ASSIS & AQUINO, 2018).

O ciclo do brócolis americano e da couve-flor varia de 60 a 90 dias, a depender da época de plantio e das variedades utilizadas. O ciclo da couve-comum e do brócolis ramoso é mais longo, 10 a 20 meses, o que possibilita a realização de várias colheitas. As mudas de brócolis e de couve-flor são obtidas a partir de sementes comerciais e as de couve-comum a partir de propagação vegetativa utilizando-se brotações laterais de plantas do cultivo anterior (GRISEL & ASSIS, 2015).

O cultivo de hortaliças na região é feito de forma intensiva por agricultores familiares, em pequenas propriedades, e com uso massivo de adubos minerais e adubação orgânica. Os solos da região são predominantemente ácidos, com relevo declivoso e manejados intensivamente sem adoção de práticas conservacionistas (MATOS, 2016; BHERING et al., 2017; ASSIS & AQUINO, 2018; LIMA et al., 2018; FRANCO et al., 2020). Para algumas hortaliças como as folhosas, por exemplo, a intensificação da produção tem levado ao alcance de até quatro ciclos anuais em uma mesma área (GRISEL & ASSIS, 2015).

As formas de relevo da região e a baixa adesão às práticas conservacionistas facilitam o transporte de frações de partículas finas do solo e seu acúmulo nas terras baixas (LIMA et al., 2018). Como consequência, observa-se uma diminuição da fertilidade natural dos solos com o passar dos anos e um aumento da dependência no uso de fertilizantes a fim de se restabelecer os níveis de fertilidade do solo (GRISEL & ASSIS, 2012; GRISEL & ASSIS, 2015). A produção intensiva e o manejo inadequado do solo e das culturas, juntamente com o relevo acidentado da região, têm levado à degradação dos sistemas produtivos incluindo o aumento da ocorrência de doenças como a hérnia das crucíferas (*P. brassicae*) (BHERING et al., 2017), e da contaminação de hortaliças por metais tóxicos (MATOS, 2016; FRANCO et al., 2020).

Um dos grandes desafios atuais na Região Serrana do Rio de Janeiro é a produção de brássicas na primavera/verão, período de entressafra e por isso de melhor rentabilidade (ASSIS & AQUINO, 2018). As temperaturas mais elevadas e as precipitações mais frequentes (INMET, 2018) dificultam a produção de várias hortaliças (MAY et al., 2007; MELO, 2015) e favorecem o desenvolvimento de pragas e doenças, dentre as quais a hérnia das crucíferas (DIXON, 2009a,b; GOSSEN et al., 2014; BHERING et al., 2017; SANTOS et al., 2020a).

2.3 Hérnia das crucíferas

2.3.1 Histórico e importância da doença

A hérnia das crucíferas, causada por *Plasmodiophora brassicae* Woronin, é um grande desafio à produção de brássicas no mundo (DIXON, 2009a,b; DIXON, 2014; HWANG et al., 2014; DIEDERICHSEN et al., 2016; BHERING et al., 2017; BOTERO et al., 2019; BHERING et al., 2020; MUIRHEAD et al., 2020). A doença tem causado perdas severas de produtividade e qualidade em cultivos de hortaliças da espécie *B. oleracea* como a couve-flor, o brócolis, repolho e couve-comum (DIXON, 2009a,b; PIAO et al., 2009; DONALD & PORTER, 2009; BHERING et al., 2017; BOTERO et al., 2019; SANTOS et al., 2020a), e em cultivos de oleaginosas como a colza/canola (DIXON, 2009a,b; GOSSEN et al., 2014; HWANG et al., 2014).

A sua ocorrência é citada em áreas cultivadas da Europa desde o século XIII e, naquela época, devido ao pouco conhecimento em microbiologia, os sintomas eram atribuídos

a diversos fatores, como condições inadequadas do solo (DIXON, 2009a; DIXON, 2014). O agente causal, *Plasmodiophora brassicae*, somente foi identificado em 1873 pelo biólogo russo M. S. Woronin após cinco anos de estudos da doença em São Petersburgo, possivelmente motivado pelas perdas apresentadas em cultivos de repolho da região (DIXON, 2009a; DIXON, 2014). Atualmente, a doença se encontra disseminada em diferentes áreas de produção de brássicas do mundo e tem sido a principal fonte de perdas de produção das lavouras (DIXON, 2009a; DIEDERICHSEN et al., 2016; MUIRHEAD et al., 2020). Estima-se que os impactos negativos da hérnia das crucíferas nas produtividades das lavouras de canola no Canadá sejam de 30 a 100% (HWANG et al., 2014). Jing et al. (2008) quantificaram as perdas pela doença em áreas de produção de colza na China e registraram redução de 10,2% na produtividade (JING et al., 2008). Altos níveis de intensidade da doença (>10%) foram identificados em áreas de produção de *B. oleracea* em países como Austrália, Canadá, Alemanha, Polônia, Escócia e Holanda (CRÊTE, 1981; DIXON, 2009a). No Nepal, a produção de couve-flor em algumas áreas foi reduzida de aproximadamente 37 Mg ha⁻¹ para 2 Mg ha⁻¹ após a introdução e disseminação da doença (TIMILA et al., 2008).

A primeira constatação de *P. brassicae* no Brasil ocorreu em 21 de novembro de 1934 em couve-comum localizada no Horto Florestal da Cantareira, em São Paulo-SP. Na ocasião, o material foi examinado e constatou-se a presença de plasmódios e esporos do patógeno nas células da planta hospedeira (VIÉGAS & TEIXEIRA, 1943). Posteriormente, novos relatos foram reportados por Café Filho & Reifschneider (1986) e Lima et al. (2004). Atualmente, as principais áreas com relatos de ocorrência e perdas pela doença estão localizadas nas regiões Sul e Sudeste, especialmente em áreas serranas e com épocas de temperaturas amenas e alta umidade do solo (MARINGONI, 1997; KOWATA-DRESCH & MAY-DE-MIO, 2012; BHERING et al., 2017).

Apesar de não existirem estudos contextualizados sobre os danos pela doença no Brasil, têm sido frequentes os relatos de perdas na região Serrana do Rio de Janeiro (GRISEL & ASSIS, 2012; CARVALHO, 2016; BHERING et al., 2017; SANTOS et al., 2017; ASSIS & AQUINO, 2018; SANTOS et al., 2019; BHERING et al., 2020; SANTOS et al., 2020a; SARAIVA et al., 2020), no Estado do Paraná (HASSE et al., 2007; RUARO et al., 2009; RUARO et al., 2010; KOWATA-DRESCH & MAY-DE-MIO, 2012), Distrito Federal (REIS, 2009; PENALBER, 2009), em São Paulo (ROSA et al., 2010; COLOMBARI et al., 2018) e em Minas Gerais (CONDÉ et al., 2017).

Na Região Serrana do Rio de Janeiro a doença tem sido mais severa nos cultivos de primavera e verão, em função das temperaturas e pluviosidade mais elevadas (BHERING et al., 2017; ASSIS & AQUINO, 2018; SANTOS et al., 2020a). Nesse período, as perdas de produção pela doença são estimadas em 40 a 60% (ASSIS & AQUINO, 2018).

2.3.2 Aspectos gerais sobre a doença

A hérnia das crucíferas é causada por *Plasmodiophora brassicae* Woronin, protozoário parasita obrigatório e habitante do solo. *P. brassicae* pertence ao Reino *Protozoa* e supergrupo eucariótico *Rhizaria* (ARCHIBALD & KEELING, 2004; BURKI et al., 2010; SCHWELM et al., 2015; BOTERO et al., 2019).

O patógeno tem a capacidade de formar esporos de resistência e sobreviver no solo onde os esporos podem permanecer viáveis na ausência de plantas hospedeiras compatíveis e também sob condições adversas de clima (DIXON, 2009b; KAGEYAMA & ASANO, 2009; DIXON, 2014). Esta característica particular aumenta a complexidade do manejo da doença nas lavouras onde o patógeno encontra-se estabelecido (DONALD & PORTER, 2009).

Segundo Hwang et al. (2012a) cada planta de canola infectada pode retornar mais de 8×10^8 unidades de esporos ao solo. Estes esporos possuem meia-vida de 3,6 anos (PENG et al., 2015) e podem ser detectados no solo por períodos superiores a 18 anos (WALLENHAMAR, 1999). Portanto, o potencial de inóculo do patógeno pode aumentar rapidamente em regiões com cultivo contínuo de espécies hospedeiras (MURAKAMI et al., 2004; PENG et al., 2015) e provocar o aumento das perdas e inviabilização de áreas para produção de brássicas.

O ciclo de vida do patógeno é complexo e ainda não é completamente compreendido (SCHWELM et al., 2015). Este pode ser dividido em três fases: sobrevivência no solo em forma de esporo de resistência; infecção de pêlos radiculares (infecção primária) e, infecção do córtex das raízes (infecção secundária) (AYERS, 1944; INGRAM & TOMMERUP, 1972; NAIKI, 1987; KAGEYAMA & ASANO, 2009). A germinação dos esporos de resistência, primeiro passo no seu ciclo (KAGEYAMA & ASANO, 2009; RASHID et al., 2013), é estimulada por exsudados radiculares de plantas hospedeiras (MATTEY & DIXON, 2015). A partir da germinação do esporo de resistência é liberado um zoósporo primário, biflagelado, que se movimenta no filme de água no solo até se aderir ao pêlo radicular mais próximo (AIST & WILLIAMS, 1971; DIXON, 2014). Esta é uma curta fase em que o patógeno está mais vulnerável e passível de ser controlado (DIXON, 2009a,b; DIXON, 2014; MATTEY & DIXON, 2015). Ao atingir a superfície do pêlo radicular, o zoósporo primário encista e o patógeno penetra na célula hospedeira levando à formação do plasmódio primário. Este passa por divisões nucleares sucessivas até a clivagem e formação de zoosporângios, com cerca de 4 a 16 zoósporos secundários cada (INGRAM & TOMMERUP, 1972). Os zoósporos secundários penetram os tecidos corticais da raiz, num processo chamado de infecção cortical ou infecção secundária (KAGEYAMA & ASANO, 2009). Dentro das células infectadas, formam-se plasmódios secundários que se proliferam e levam à hipertrofia celular (SCHWELM et al., 2015; SCHULLER & LUDWIG-MÜLLER, 2016). Os plasmódios secundários possuem, inicialmente, dois núcleos e, após uma série de divisões nucleares se tornam multinucleados, os chamados plasmódios multinucleados (GARBER & AIST, 1979a,b; MITANI et al. 2003).

Os plasmódios provocam alterações na divisão e expansão celular das raízes infectadas causando hipertrofias e hiperplasia que culminam com a formação de galhas e obstrução ao processo de absorção de água e nutrientes pela planta (SCHWELM et al., 2015; SCHULLER & LUDWIG-MÜLLER, 2016). Com a senescência e morte das plantas, formam-se os esporos de resistência no interior das galhas (INGRAM & TOMMERUP, 1972). Os esporos de resistência são liberados no solo durante o apodrecimento gradual das raízes. Estes colaboram para as infecções nos cultivos subsequentes de brássicas e podem ser transportados de um ponto para outro dentro da área, principalmente por arraste no escoamento superficial de água e transporte de solo contaminado. Entre as áreas, a disseminação pode ocorrer por meio de escoamento de água, e por mudas e solos contaminados via maquinário e implementos agrícolas (PENALBER, 2009; GOSSEN et al., 2014; SANTOS et al., 2019).

Os sintomas da doença podem variar de acordo com a hospedeira, severidade e condições do ambiente. No geral, o principal sintoma é a formação de galhas (hérnias) irregulares no sistema radicular. Estas galhas prejudicam a absorção de água e de nutrientes, e podem provocar sintomas secundários de deficiência nutricional, amarelecimento, e murcha das folhas, principalmente nos períodos mais quentes do dia. Todos esses distúrbios provocam o subdesenvolvimento das plantas hospedeiras que, em consequência, apresentam baixo valor comercial, afetando a produtividade e a rentabilidade. Sob condições favoráveis ao desenvolvimento da doença, também pode ocorrer a morte prematura das plantas (HOWARD et al., 1994; MARINGONI, 1997; ITO et al., 1999; CARRIJO & REGO, 2000; DIXON,

2009a,b; PENALBER, 2009; HWANG et al., 2014; SCHWELM et al., 2015; BOTERO et al., 2019).

Todos os membros da família Brassicaceae são potenciais hospedeiros de *P. brassicae* e assim são considerados se o patógeno consegue completar todos os estádios de seu ciclo de vida (DIXON, 2009a). Existem relatos de infecções primárias nos pêlos radiculares de algumas espécies das famílias Poaceae, Rosaceae, Papaveraceae, porém, sem que o patógeno consiga completar o seu ciclo (WEBB, 1949; MACFARLANE, 1952; DIXON, 2009a). Neste segundo caso, as plantas são identificadas como não hospedeiras e citadas como de uso potencial como plantas iscas para o controle da doença (HASSE et al., 2007; DIXON, 2009b; VIDAL, 2012; DIXON, 2014).

2.3.3 Manejo visando redução da hérnia das crucíferas

O manejo visando à redução das perdas pela hérnia das crucíferas tem sido baseado em duas estratégias principais: a prevenção, evitando-se a introdução do patógeno em áreas isentas; a redução, por meio de medidas que minimizem as perdas pela doença em áreas já contaminadas (GOSSEN et al., 2015; BOTERO et al., 2019). No entanto, tendo em vista as limitadas opções de medidas de controle da doença, a prevenção é a principal estratégia. Tendo como base o ciclo do patógeno e o modo como pode ser disperso, recomenda-se como medidas de caráter preventivo o uso de mudas sadias, adquiridas em viveiristas idôneos, manejo correto do solo, uso de água de boa qualidade e isenta de contaminação, lavagem e sanitização de pneus de tratores e dos implementos agrícolas (REIS, 2009; DONALD & PORTER, 2009; GOSSEN et al., 2014; BOTERO et al., 2019; SANTOS et al., 2019).

Uma vez presente na área, o controle da doença deve ser planejado considerando-se um conjunto integrado de medidas que levem à redução da viabilidade e concentração dos esporos de resistência do patógeno no solo e a restrição à dispersão dos mesmos entre as áreas (DIXON, 2009a,b; DONALD & PORTER, 2009; HWANG et al., 2014; SANTOS et al., 2019); à melhoria das características químicas, físicas e biológicas do solo tornando-o menos condutivo à doença (DONALD & PORTER, 2009; GOSSEN et al., 2014; BHERING et al., 2017) e ao melhor desenvolvimento do sistema radicular das plantas (BHERING et al., 2017; SANTOS et al., 2017; SANTOS et al., 2020a).

Dentre as principais medidas que podem levar à redução do inóculo estão a rotação com culturas não hospedeiras e o aumento do intervalo entre os cultivos de brássicas (REIS, 2009; DONALD & PORTER, 2009; PENG et al., 2015; BOTERO et al., 2019); e a remoção e destruição de raízes com galhas (DONALD & PORTER, 2009). Como o patógeno *P. brassicae* é favorecido por solos ácidos e com baixos teores de Ca^{2+} , a calagem torna o ambiente menos favorável à germinação dos esporos resistentes e ao processo de infecção e, ainda, melhora o desenvolvimento das plantas hospedeiras (NIWA et al., 2008; DIXON, 2009a,b; DONALD & PORTER, 2009; DIXON et al., 2014; GOSSEN et al., 2014; HWANG et al., 2014; BHERING et al., 2017; SANTOS et al., 2017; SANTOS et al., 2020a).

Outras estratégias de manejo da doença se baseiam na redução do período de exposição da planta ao patógeno e no favorecimento da fração sadia do sistema radicular. Quando o início do processo de infecção é retardado, reduz-se o período de exposição da planta ao patógeno (HWANG et al., 2011; HWANG et al., 2012b). A escolha da época e local de plantio com condições menos favoráveis ao patógeno e mais favoráveis ao desenvolvimento da planta pode colaborar nesse processo. Devem ser priorizados períodos de temperaturas mais amenas e com menor precipitação, áreas com boa drenagem e menos sujeitas a encharcamento (DIXON, 2009a,b).

Apesar de ser uma importante estratégia no manejo de doenças de plantas, o uso de cultivares resistentes no controle da hérnia das crucíferas ainda é restrito. As dificuldades no desenvolvimento e manutenção de cultivares resistentes podem estar associadas à variabilidade genética de *P. brassicae* (ROCHERIEUX et al., 2004; HIRAI, 2006; PIAO et al., 2009). Grande variabilidade genética do patógeno tem sido registrada em isolados de diferentes regiões e países. Ainda, a existência de diferentes patótipos de *P. brassicae* tem sido considerada na seleção e recomendação de cultivares resistentes, quando estas estão disponíveis (VOORRIPS, 1995; STRELKOV et al., 2007; RICAROVA et al., 2016; STRELKOV et al., 2016; STRELKOV et al., 2020).

A disponibilidade e uso de cultivares resistentes é feita em maior escala em áreas de produção de canola. No entanto, a quebra da resistência tem sido observada com frequência, provavelmente, pela pressão de seleção imposta ao patógeno pelo uso continuado das mesmas cultivares resistentes (STRELKOV et al., 2016). Já no caso de hortaliças, poucas são as opções de cultivares resistentes disponibilizadas no mundo (DONALD & PORTER, 2009). No Brasil, nos catálogos das principais empresas que comercializam sementes de brássicas, constam apenas os híbridos de couve-chinesa Akira F1, Victory F1, Kinjtsu F1 (AGRISTAR, 2020), Natsume e Naomi (SAKATA, 2020), Eikoo (HORTICERES, 2020), Macau, Atsui (FELTRIN, 2020), Suzuko (BEJO, 2020), e os híbridos de repolho, Heleno F1 (AGRISTAR, 2020) e Wasaby (FELTRIN, 2020). Estes são comercializados como tolerantes, resistentes ou moderadamente resistentes a *P. brassicae*.

O uso de produtos químicos para o controle da hérnia das crucíferas é limitado e de alto custo. Resultados consistentes têm sido associados a um número muito pequeno de princípios ativos químicos (DONALD & PORTER, 2009; HWANG et al., 2014). No Brasil, existe apenas um princípio ativo registrado no Ministério da Agricultura (MAPA), o ciazofamida, destinado ao controle de *P. brassicae* em repolho, couve-flor, couve-chinesa e brócolis (AGROFIT, 2020). O ciazofamida é um fungicida de contato e atua na inibição da germinação dos esporos de resistência de *P. brassicae* (MITANI et al., 2003; AGROFIT, 2020). Segundo o fabricante, é recomendada a aplicação preventiva nas mudas em bandejas e de 2 a 3 aplicações no solo após o transplântio das mudas para o campo. Resultados positivos com o uso de ciazofamida foram obtidos por Peng et al. (2011) em canola (*B. napus*), por Santos et al. (2017) na cultura da couve-flor, Colombari et al. (2018) na cultura da rúcula, e por Irokawa et al. (2020) em repolho. No entanto, os custos de aplicação e os questionamentos ambientais, podem ser proibitivos ao seu uso em cultivos comerciais de larga escala (HWANG et al., 2014).

Embora seja levantado como possibilidade, o controle biológico ainda não é usado em escala comercial e ainda não há produto biológico registrado no MAPA para manejo visando redução da hérnia das crucíferas (AGROFIT, 2020). Relatos positivos de pesquisa envolvendo o uso de agentes de biocontrole no manejo da doença já foram obtidos, apesar de alguns resultados serem controversos (DONALD & PORTER, 2009; PENG et al., 2011; BOTERO et al., 2019).

O fungo endofítico *Heteroconium chaetospora*, por exemplo, foi eficaz no controle da hérnia em couve-chinesa em condições de baixa a moderada umidade do solo e com densidade do patógeno abaixo de 10^5 esporos por grama de solo (NARISAWA et al., 2005). Gao & Xu (2014) avaliaram a combinação de esterilização de solo com calor aliado ao uso de um coquetel de agentes de controle biológico (*Bacillus megaterium*, *Clostridium tyrobutyricum* e *Saccharomyces cerevisiae*) e concluíram que estas práticas apresentam potencial como um método não químico contra *P. brassicae* em couve-chinesa.

Lahlali et al. (2013) testaram produto comercial à base de *Bacillus subtilis* e observaram indícios de supressão da doença via antibiose e indução de resistência em canola (LAHLALI et al., 2013). He et al. (2019) observaram resultados positivos com o uso de *B.*

subtilis de forma preventiva e nos estágios iniciais da hérnia das crucíferas visando a redução dos danos causados pela doença (HE et al., 2019). Resultados positivos com uso de *B. subtilis* também foram obtidos por Peng et al. (2011) e Gossen et al. (2016).

O uso de isolados de *Trichoderma harzianum* reduziram a severidade da doença em couve chinesa e couve-flor (CHEAH & PAGE, 1997; CHEAH et al., 2000). Santos et al. (2017) e Castillo & Guerrero (2008), ao avaliarem produto comercial à base de *T. harzianum*, não obtiveram efeitos satisfatórios sobre a redução da doença em couve-flor e brócolis, respectivamente.

Khalid et al. (2020) avaliaram o fungo endófito benéfico *Piriformospora indica* em plantas couve-chinesa (*B. campestris* sp. *chinensis*). Os autores concluíram que *P. indica* tem resultados satisfatórios na redução da doença e efeitos sobre o crescimento e a qualidade nutricional das plantas. Os resultados sugerem que *P. indica*, e talvez outros endossimbiontes benéficos, podem ser uma ferramenta eficaz para o tratamento de infecções por *P. brassicae*.

A utilização de compostos orgânicos é usualmente preconizada para o manejo integrado da hérnia das crucíferas tendo em vista a melhorias nas condições químicas e biológicas do solo (NIWA et al., 2007; PENALBER, 2009). Apesar disso, resultados contraditórios também são reportados, principalmente no tocante a qualidade da matéria orgânica adicionada (BHERING et al., 2017; LIMA, 2019; BHERING et al., 2020). O efeito de compostos e resíduos orgânicos sobre a doença está relacionado, dentre outros aspectos, às características da matéria orgânica adicionada, ao seu manejo e ao tempo e forma de compostagem (LIMA, 2019). Condé et al. (2017) avaliaram a aplicação de 0, 100, 200 e 400 g de bokashi m⁻² em repolho e concluíram que o aumento das doses proporcionou maior desenvolvimento vegetativo das plantas e menor incidência e severidade da hérnia.

2.3.4 Interação entre *Plasmodiophora brassicae* e plantas hospedeiras e não-hospedeiras

A população de *P. brassicae* no solo ao longo do tempo pode ser influenciada pela presença de plantas hospedeiras, suscetíveis e resistentes, e de plantas não hospedeiras (DIXON, 2009a,b; DONALD & PORTER, 2009; VIDAL, 2012; DIXON, 2014). O cultivo sequencial de brássicas suscetíveis à *P. brassicae* na mesma área favorece o aumento de inóculo do patógeno e da intensidade da doença nos cultivos subsequentes (DIXON, 2009a,b). A redução do potencial de inóculo do patógeno no solo pode ser obtida com o plantio de cultivares resistentes. Takahashi et al. (2006) encontraram plasmódios primários de *P. brassicae* em raízes de cultivares de *Brassica rapa* suscetíveis e resistentes ao patógeno, entretanto, a ocorrência de plasmódios secundários somente foi observada em raízes de cultivares suscetíveis.

Peng et al. (2015) estudaram o efeito da rotação de culturas em canola e concluíram que a maioria dos esporos de resistência de *P. brassicae* se desintegram nos primeiros dois anos no solo. A realização de uma pausa no cultivo de canola suscetível por 2 a 4 anos pode atenuar o impacto causado pela doença e promover incrementos na produtividade, quando comparado ao cultivo contínuo (PENG et al., 2015).

A rotação e sucessão com culturas de famílias botânicas distintas são métodos antigos e sustentáveis no manejo de doenças de plantas (LOURENÇO et al., 2016). Para o caso da hérnia das crucíferas, estudos demonstram que *P. brassicae* também é capaz de infectar os pêlos radiculares de algumas espécies pertencentes às famílias Poaceae, Rosaceae, Papaveraceae, Polygonaceae, Resedaceae e Fabaceae, desenvolvendo apenas sua fase primária (WEBB, 1949; MACFARLANE, 1952; DIXON, 2009b; DIXON, 2014). Estas espécies, portanto, atuam como “plantas-iscas” ou “plantas-armadilhas”, estimulando a

germinação dos esporos de *P. brassicae* e reduzindo o potencial de inóculo para os cultivos subsequentes de brássicas (VIDAL, 2012).

Friberg et al. (2006) observaram que os ambientes de solo criados por alho-poró (*Allium porrum*), centeio (*Secale cereale*) e azevém (*Lolium perenne*) em ensaios de casa-de-vegetação tenderam a reduzir o crescimento de *P. brassicae*, mas esses efeitos não foram eficazes em condições de campo. Os autores mencionam ainda uma multiplicidade de fatores relacionados a esse fenômeno como o aumento do pH do solo resultante da incorporação de biomassa de plantas pré-cultivadas e que pode ser um dos mecanismos envolvidos na redução da severidade da doença em brássicas (FRIBERG et al., 2006).

Ensaio em vasos feitos por Hasse et al. (2007) demonstraram que o pré-plantio de menta (*Mentha piperita*), alfavaca (*Ocimum basilicum*), bardana (*Arctium minus*), cebolinha (*Allium fistulosum*), e salsa (*Petroselinum hortense*) proporcionaram maior massa aérea fresca e menor severidade de hérnia em rúcula cultivadas em sequência (HASSE et al., 2007). Hwang et al. (2015), por sua vez, demonstraram que a rotação de canola com cevada (*Hordeum vulgare*), ervilha (*Pisum sativum*) e aveia (*Avena sativa*) reduziram a ocorrência da doença e a concentração de esporos de *P. brassicae* em comparação ao cultivo contínuo de canola resistente ou suscetível.

Mais recentemente, Chen et al. (2018) estudaram os efeitos da rotação de couve-chinesa com chalota (*Allium cepa* var. *aggregatum* Don.). As plantas de couve-chinesa rotacionadas com chalota apresentaram menor ocorrência da doença quando comparada ao cultivo contínuo. A partir de estudos mais minuciosos, observou-se também que os exsudatos radiculares da chalota diminuíram o número de plasmódios secundários de *P. brassicae*, o que pode indicar um papel importante na supressão da doença (CHEN et al., 2018).

Apesar de vários exemplos de resultados positivos, ainda se conhece pouco sobre as interações entre plantas que estimulam a geminação dos esporos resistentes de *P. brassicae*, nas quais o patógeno não consegue completar o seu ciclo (DONALD & PORTER, 2009). Acredita-se, no entanto, que o plantio destas espécies possa contribuir para a redução do potencial de inóculo no solo, além do efeito como adubo verde. Esta prática é benéfica por promover a ciclagem de nutrientes e elevar o nível de matéria orgânica no solo (ARAÚJO et al., 2011; CORDEIRO et al., 2018; CASTRO & DEVIDE, 2018) o que pode favorecer o desenvolvimento da cultura de interesse.

2.3.5 Correção da acidez do solo no manejo da hérnia das crucíferas e produção de *Brassica* spp.

A hérnia das crucíferas é mais severa em solos ácidos e com baixos teores de Ca^{2+} . Portanto, a utilização de corretivos de acidez é uma importante estratégia para a redução da doença e melhor desenvolvimento das plantas (DONALD & PORTER, 2009; HWANG et al., 2014; SANTOS et al., 2017; SANTOS et al., 2020a). As brássicas, em geral, são exigentes em fertilidade do solo, requerem pH próximo do neutro (6,5) e são intolerantes ao Al^{3+} (MAY et al., 2007; FILGUEIRA, 2008; GUERRA et al., 2013; MELO, 2015; SANTOS et al., 2017).

Diferentes corretivos de solo podem ser utilizados no manejo da hérnia das crucíferas em lavouras de *Brassica* spp. O principal deles é o calcário, que é composto por carbonato de cálcio e/ou de magnésio, que além de eficiente na correção da acidez do solo, fornece Ca^{+2} e/ou Mg^{+2} , e reduz a disponibilidade de Al^{3+} tóxico às plantas (SOUSA et al., 2007; CAMPOS et al., 2013). Em condições de campo, a calagem proporciona melhoria nos atributos químicos do solo, favorece o crescimento radicular das brássicas, o que pode amenizar as perdas de raízes ativas pelo patógeno (SANTOS et al., 2017; SANTOS et al., 2020a).

Além do calcário, outros corretivos de maior reatividade no solo, como a cal virgem ou cal hidratada, também podem ser utilizados (SOUZA et al., 2007; SANTOS et al., 2017; SANTOS et al., 2020a), assim como resíduos com ação corretiva, como a escória de siderurgia. Santos et al. (2017) observaram redução da severidade da hérnia das crucíferas e incremento na massa fresca sadia de raízes de couve-flor com a utilização de cal virgem.

A escória da siderurgia é oriunda da indústria siderúrgica e apresenta em sua composição silicatos de cálcio e magnésio capazes de corrigir a acidez do solo (ALCARDE, 1992; NOBILE, 2009). Devido à sua grande disponibilidade e baixo custo, tem sido preconizada para algumas culturas, especialmente a cana-de-açúcar, e com efeito similar ao calcário (ALCARDE, 1992; NOBILE, 2009; VIDAL & PRADO, 2011; PREZOTTI & MARTINS, 2012; OZA et al., 2018).

A escória de siderurgia também proporciona o aporte de silício às plantas (NOBILE, 2009). Este elemento, apesar de não ser classificado como um nutriente essencial, vem sendo associado a uma série de benefícios que inclui o aumento da resistência ao ataque de pragas e doenças (CAI et al., 2009; POZZA et al., 2015). Tendo-se como base os efeitos conhecidos do cálcio e do boro (GOSSEN et al. 2014), especula-se que o silício também poderia atuar nas paredes celulares e dificultar o processo de infecção das raízes por *P. brassicae* com consequências positivas na redução da severidade da doença. Pouco se conhece, porém, sobre os efeitos da escória de siderurgia ou do silício sobre o desenvolvimento de *Brassica* spp. e da hérnia das crucíferas.

A eficiência dos corretivos na correção da acidez do solo e no controle da hérnia das crucíferas é variável. As características do material utilizado como o poder neutralizante, tamanho e distribuição das partículas, quantidade, umidade, textura do solo e variações no período entre aplicação e plantio podem influenciar no processo (CAMPOS et al., 2013; DONALD & PORTER, 2009; SANTOS et al., 2020a).

2.3.6 Uso de compostos orgânicos no manejo da hérnia das crucíferas

A utilização de compostos ou resíduos orgânicos pode contribuir para o controle de doenças de plantas (HADAR & POPADOPOULOU, 2012) por tornar o ambiente menos favorável ao seu desenvolvimento. Dessa forma, modificar as condições do solo através do uso de materiais orgânicos, fertilizantes e práticas de preparo do solo, ou por meio da adição de antagonistas microbianos pode influenciar a supressividade ou conducividade à hérnia das crucíferas (DIXON & TILSTON, 2010). A supressão das doenças causadas por patógenos de solo com o uso de compostos orgânicos é frequentemente atribuída à atividade de microrganismos do solo ou a metabólitos microbianos (MEGHVANSI & VARMA, 2015). Apesar disso, fatores químicos e físicos também estão implicados nesse processo complexo e dinâmico (MURAKAMI et al., 2000; NOBLE & COVENTRY, 2005).

As propriedades físico-químicas dos compostos aplicados ao solo, incluindo o pH e o teor de matéria orgânica, podem contribuir para a supressão de doenças, diretamente, como no caso evidente da hérnia das crucíferas (NIWA et al., 2007) ou indiretamente, através de sua influência na atividade microbiana do solo (NIWA et al., 2007; MEGHVANSI & VARMA, 2015). Apesar disso, ainda existem muitas lacunas no conhecimento sobre como os fatores químicos, físicos e biológicos atuam na supressão da hérnia das crucíferas com base no uso de materiais orgânicos (GOSSEN et al., 2014; GOSSEN et al., 2016; BONANOMI et al., 2018).

Alta severidade da hérnia das crucíferas foi associada a baixo teor de matéria orgânica no solo (WALLENHAMMAR, 1996; MURAKAMI et al., 2000), enquanto que a adição de compostos orgânicos ao solo foi associada à sua redução (NIWA et al., 2007; PENALBER, 2009; CONDÉ et al., 2017; SANTOS et al., 2018a). Apesar disso, os resultados obtidos

podem ser variáveis ou contraditórios em função dos múltiplos fatores e interações que podem estar envolvidos.

A matéria orgânica favorece a atividade microbiana e a disponibilidade de nutrientes, o que pode tornar as condições mais favoráveis para o crescimento das raízes e menos favoráveis ao processo de infecção por *P. brassicae* (NIWA et al., 2007; DIXON & TILSTON, 2010). No entanto, a eficácia e os níveis de controle são variáveis. Fatores como a natureza química dos materiais utilizados, teor e forma dos nutrientes, processo de compostagem e grau de decomposição, tipo de microrganismos presentes, pH, e composição nutricional são os prováveis responsáveis pelas variações nos resultados encontrados (TERMORSHUIZEN et al., 2006; DIXON, 2009a,b; MEGHVANSI & VARMA, 2015; LIMA, 2019).

Niwa et al. (2007) demonstraram que a microbiota do solo e o aumento nos teores de cálcio e do pH do solo estiveram envolvidos na supressão da hérnia das crucíferas em áreas onde uma grande quantidade de matéria orgânica foi incorporada ao longo de quinze anos. Os autores sugeriram que ambos os fatores foram importantes na redução da doença, apesar do efeito predominante da elevação do pH do solo (NIWA et al., 2007). A acidez do solo, como já se sabe, possui influência direta no estabelecimento de *P. brassicae* nas raízes de *Brassica* spp. (WEBSTER & DIXON, 2001a,b; DIXON, 2009a,b; DONALD & PORTER, 2009; GOSSSEN et al., 2014; BHERING et al., 2017; SANTOS et al., 2020a).

Penalber (2009) avaliou o efeito da aplicação de compostos bioativos, utilizados na agricultura natural, sob a ocorrência de hérnia em brócolis e obteve resultados positivos nas condições de médio potencial de inóculo do patógeno no solo. Os compostos utilizados elevaram o pH do solo, reduziram o Al^{3+} e a acidez potencial, e aumentaram os teores de cálcio (PENALBER, 2009). Noble (2011) aponta que o aumento do pH resultante da aplicação de compostos possui relação consistente com a supressão de algumas doenças, no entanto, este fator provavelmente não é o único responsável por conferir supressividade (NOBLE, 2011). De igual forma, Murakami et al. (2000) afirmam que o pH desempenha papel importante na supressão da hérnia das crucíferas, apesar de que outros fatores abióticos também possam estar associados.

Os compostos orgânicos são capazes de alterar a fertilidade e a microbiota do solo de forma benéfica ou prejudicial, dependendo da sua qualidade (NOBLE & COVENTRY, 2005; BERNAL et al., 2009; BONANOMI et al., 2018). O grau de estabilidade e maturidade interferem na qualidade do material e são requisitos ponderados para que um composto possa ser usado com segurança no solo, o que implica em teor estável de matéria orgânica e a ausência de compostos fitotóxicos e prejudiciais às plantas (STOFFELLA & KAHN, 2001).

A maturidade é o grau ou nível de completude da compostagem e implica em qualidades aprimoradas do composto resultante de seu "envelhecimento" ou "cura" (STOFFELLA & KAHN, 2001; BERNAL et al., 2009), estando, ainda, associada ao potencial de crescimento das plantas sem causar fitotoxicidade (IANNOTTI et al., 1993). A estabilidade, por sua vez, está frequentemente relacionada com a atividade microbiana do composto. No entanto, tanto a estabilidade como a maturidade são características com relação estreita, uma vez que, compostos fitotóxicos são produzidos pelos microrganismos presentes em compostos instáveis (ZUCCONI et al., 1985; BERNAL et al., 2009).

Diversos autores revisados por Bernal et al. (2009) indicam que a redução de carbono orgânico solúvel, dos efeitos fitotóxicos e da atividade microbiana, além de aumento na humificação da matéria orgânica, são indicadores da estabilização progressiva dos materiais compostados (BERNAL et al., 2009). Aliado a isso, a redução da concentração de $N-NH_4^+$ e o incremento de nitrogênio na forma de $N-NO_3^-$ é um indicativo para que o composto seja considerado pronto para uso, demonstrando que altas concentrações de $N-NH_4^+$ estão

associadas a materiais imaturos (FINSTEIN & MILLER, 1985; STOFFELLA & KAHN, 2001; BERNAL et al., 2009).

A aplicação de compostos orgânicos imaturos e não estabilizados tem sido associados a efeitos negativos no desenvolvimento das plantas (BERNAL et al., 2009; JUAREZ et al., 2015) por imobilizar o N e liberar substâncias tóxicas no solo, ou por aumentar a competição por O₂ na rizosfera (GUO et al., 2012), ou ainda pela fitotoxidez decorrente do aumento da concentração de NH₄⁺ (MULEC et al., 2016). Os possíveis efeitos de compostos orgânicos sobre a hérnia das crucíferas ainda apresentam muitas lacunas. Especula-se que com a aplicação de compostos imaturos, além da liberação de compostos fitotóxicos poderia favorecer a hérnia das crucíferas pela alta liberação de nitrogênio na forma amoniacal, que é mais favorável à doença do que o N na forma de nitrato (DIXON & PAGE, 1998; RUARO et al., 2009). Portanto, nestas condições é provável que o comprometimento do sistema radicular causado pela hérnia das crucíferas seja potencializado tanto pela limitação ao crescimento das raízes, quanto pelo aumento da concentração de NH₄⁺.

2.3.7 Cama de aviário, sua compostagem, e seus efeitos na severidade da hérnia das crucíferas e desenvolvimento de *Brassica* spp.

A cama de aviário é um resíduo orgânico gerado em grandes quantidades em granjas de produção de aves (ROGERI et al., 2016; PARENTE et al., 2019). É composta por uma mistura do material usado para forração das granjas, fezes das aves, sobras de ração e penas liberadas pelas aves que resultam em acúmulo de macro e micronutrientes essenciais para as plantas (RADULESCU et al., 2013; ROGERI et al., 2016). Em função da alta disponibilidade em algumas regiões e elevada quantidade de nutrientes, este resíduo tem sido utilizado como fertilizante orgânico na produção de hortaliças diversas (BHERING et al., 2017; LIMA, 2019; PARENTE et al., 2019; BHERING et al., 2020).

A possível relação entre cama de aviário e a intensidade da hérnia das crucíferas foi levantada por Bhering et al. (2017). Apesar da hérnia das crucíferas ser comumente associada a solos com baixo teor de matéria orgânica (WALLENHAMMAR, 1996; MURAKAMI et al., 2000), levantamentos de campo em áreas de produção de couve-flor em Nova Friburgo, RJ, identificaram maior intensidade da doença em solos de pH baixo e com maior teor de matéria orgânica (BHERING et al., 2017; BHERING et al., 2020). Os autores associaram esta relação à utilização a longo prazo e massiva de cama de aviário fresca, isto é, sem passar pelo processo de tratamento ou compostagem, e à não realização de calagem. Ao ser mineralizada, a matéria orgânica do solo pode resultar em elevação de temperatura e liberação de ácidos orgânicos e inorgânicos com consequente liberação de íons H⁺ (ECHART & CAVALLI-MOLINA, 1999; HAYNES & MOKOLOBATE, 2001), dependendo do material, quantidade, época e tipo de solo (ZAMBOLIM & VENTURA, 2012). Com a redução do pH, há aumento da solubilidade de Al trocável que também prejudica o desenvolvimento radicular e que pode agravar as perdas causadas pela doença (BHERING, 2017; BHERING et al., 2020).

As interações envolvendo o uso de cama de aviário e a ocorrência da hérnia das crucíferas são complexas e ainda não se encontram totalmente esclarecidas. Lima (2019) avaliou em condições controladas o uso de cama de aviário fresca e compostada por 30, 60, 90 ou 120 dias e observou que ambos os materiais reduziram a severidade da doença e aumentaram o crescimento de plantas de couve-flor. Apesar disso, a cama de aviário fresca se mostrou mais restritiva em relação aos materiais compostados por causar fitotoxicidade às plantas em doses mais elevadas.

A cama de aviário apresenta altos valores iniciais de pH e de teores de cálcio (ROGERI et al., 2016; LIMA, 2019; SOUZA et al., 2019) que se elevam em função do tempo de compostagem (LIMA, 2019; SOUZA et al., 2019). Apesar de estas características serem, a

princípio, interessantes do ponto de vista de manejo da hérnia das crucíferas, pouco se conhece sobre a evolução do pH e as transformações no solo resultantes do uso desse resíduo durante o ciclo de crescimento das plantas e a longo prazo. A degradação microbiana de esterco e outros resíduos orgânicos, como a cama de aviário, também são capazes de liberar compostos tóxicos e voláteis como a amônia, que podem interferir na atividade microbiana no solo (LAZAROVITS, 2001; GAMLIEL & STAPLETON, 1993a, 1993b; ZAMBOLIM & VENTURA, 2012; MEGHVANSI & VARMA, 2015).

2.4 Contaminação de hortaliças por metais

2.4.1 Metais pesados

O termo metal pesado é usado para definir elementos metálicos e não metálicos presentes no ambiente que apresentem densidade atômica superior a 6 g cm^{-3} e número atômico maior que 20, que estejam associados à toxicidade a seres vivos, à poluição e à contaminação ambiental (AMARAL SOBRINHO, 1992; TAN, 2009). Apesar disso, o termo tem sido alvo de constantes debates por alguns autores (AMARAL SOBRINHO et al., 2009).

Os metais pesados, geralmente, apresentam efeito acumulativo no ambiente por não serem biodegradáveis e, com isso, podem ser introduzidos com facilidade na cadeia trófica (MALAVOLTA, 1994; SPOSITO, 2008). A sua origem pode ser litogênica ou por meio de atividades antropogênicas (SPOSITO, 2008; ALLOWAY, 2013). No primeiro caso, a presença natural destes elementos está relacionada ao material de origem sobre o qual o solo se formou e aos processos de formação, influenciando na composição e na proporção dos componentes de sua fase sólida (BINI et al., 2011). No segundo caso, está relacionado a atividades como: agricultura; urbanização; siderurgia/metalurgia, industrialização, mineração, entre outras, e vem contribuindo para o aumento dos níveis desses elementos tóxicos no solo (FACCHINELLI, 2001; HE et al., 2005; BINI et al., 2011; JI et al., 2013; ISLAM et al., 2014; CAO et al., 2020).

Alguns metais como chumbo (Pb) e cádmio (Cd) não possuem funções biológicas conhecidas e são muito tóxicos aos organismos vivos (HE et al., 2005). Estes elementos despertam maiores preocupações quanto aos efeitos deletérios à saúde humana pois, além de não terem função biológica conhecida, são facilmente transferidos através da cadeia alimentar (SHAHEEN et al., 2016). Outros metais como cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn), e ferro (Fe), são considerados micronutrientes quando em quantidades apropriadas. Apesar disso, em elevadas concentrações, também podem ser potencialmente tóxicos à saúde humana (GALL et al., 2015; JAVED & USMANI, 2016; SHAHEEN et al., 2016; COUTO et al., 2018a).

A dinâmica dos metais no solo é complexa, pois esses elementos tóxicos apresentam diversos tipos de interação com a fase sólida resultando em diferentes formas ou frações geoquímicas e que interferem na sua mobilidade e biodisponibilidade (HE et al., 2005; SPOSITO, 2008; ALLOWAY, 2013). Sabe-se que a maior ou menor mobilidade dos metais será determinada pelos atributos do solo, como pH, teor de matéria orgânica, teores e tipos de argila, capacidade de troca de cátions, entre outros, e que influenciarão nas reações de adsorção/dessorção, precipitação/dissolução, complexação e oxirredução (OLIVEIRA & MATTIAZZO, 2001; BOSE & BHATTACHARYYA, 2008; SPOSITO, 2008). Dentre essas propriedades, o pH é citado como um dos fatores que mais afeta a distribuição química, mobilidade e disponibilidade de metais no solo (KABATA-PENDIAS & ADRIANO, 1995). O valor de pH tem efeito direto na solubilidade e biodisponibilidade de metais divalentes e promove uma redução equivalente a 100 vezes com o aumento de apenas uma unidade de pH (SPOSITO, 2008).

A matéria orgânica no solo pode interagir com os metais de duas maneiras: por complexação dos metais com a matéria orgânica insolúvel, reduzindo a sua disponibilidade;

ou formando complexos solúveis, especialmente com ácidos fúlvicos, aumentando a disponibilidade do metal (BARBER, 1995). Estes complexos solúveis podem ser absorvidos pelas plantas e armazenados em tecidos vegetais com baixa fitotoxicidade ou produção de compostos inativos (BOLAN et al., 2014; SHAHID et al., 2012; SILVA et al., 2017; SOUSA et al., 2020). Silva et al. (2017) observaram que entre substâncias na matéria orgânica do solo, os ácidos fúlvicos formam complexos altamente estáveis com Pb, aumentando sua solubilidade e biodisponibilidade no solo, potencializando os riscos de contaminação (SILVA et al., 2017).

A absorção de metais pelas plantas é afetada, além da capacidade específica da espécie, por fatores do solo, dos quais os mais significativos são pH, potencial de redução, teor de argila, matéria orgânica, CTC, balanço de nutrientes e concentração de outros metais (ALLOWAY, 2013; MOURATO et al., 2015; KABATA-PENDIAS, 2011). Os mecanismos de absorção de metais pelas raízes envolvem vários processos, como a troca catiônica pelas raízes, transporte dentro das células por agentes quelantes ou outros transportadores, além de efeitos da rizosfera (KABATA-PENDIAS, 2011).

O transporte de íons dentro dos tecidos e órgãos vegetais envolve muitos processos: (1) movimento em xilema, (2) movimento no floema, (3) armazenamento, acumulação e imobilização. Os agentes quelantes são importantes no controle da translocação de cátions em plantas. A complexação de cátions com ácidos orgânicos evita sua imobilização no xilema e permite sua transferência para os tecidos da parte aérea. Ainda, a imobilização de metais nas raízes devido a vários processos tem um impacto dominante na sua translocação para a parte aérea das plantas (KABATA-PENDIAS, 2011).

O acúmulo de metais nos vegetais é variável em função da espécie, cultivar e do órgão da planta. Elevados teores de metais nos tecidos vegetais podem ser registrados sem o aparecimento de sintomas evidentes de fitotoxicidade ou redução na produtividade da cultura (KORENTAJER, 1991; CUNHA et al., 2008). Espécies de plantas do gênero *Brassica* são citadas por apresentarem tolerância a metais e grande extração e acúmulo desses elementos tóxicos nos tecidos (GISBERT et al. 2006; RADULESCU et al. 2013; MOURATO et al. 2015; TAGHIZADEH et al., 2018). Os mecanismos de adaptação das plantas ao excesso de metais nos substratos podem estar relacionados a vários processos como a complexação e quelação de íons fora das células vegetais (principalmente nas raízes); ligação de íons às paredes celulares; absorção seletiva de íons e imobilização em vários órgãos como compostos imóveis (KABATA-PENDIAS, 2011). A quelação é citada como um dos mecanismos mais importantes para a tolerância de espécies de *Brassica* a metais por facilitar a translocação e acumulação desses elementos na parte aérea e reduzir sua toxicidade para a planta (MOURATO et al., 2015).

A taxa de transferência de metais do solo para as plantas varia de acordo com o metal e a espécie. Metais como Cd e Zn, apresentam, em geral, maiores taxas de transferência do solo para hortaliças, enquanto o Cr e o Pb apresentam menores taxas (KORENTAJER, 1991). Já a translocação, que se refere ao movimento ou a transferência do íon do local de absorção na raiz para outro ponto qualquer, fora da raiz (MALAVOLTA et al., 1997), é geralmente mensurada a partir do índice de translocação (IT) (ABICHEQUER & BOHNEN, 1998; MATOS, 2016; SOUSA, 2017; RIBEIRO, 2019). Este índice representa a porcentagem da quantidade total absorvida, que foi transferida para a parte aérea (ABICHEQUER & BOHNEN, 1998). Matos (2016) observou elevada translocação (>80%) de Cd, Pb, Zn, Cu e Mn para a parte aérea de plantas de couve-flor ao estudar os fatores de solo relacionados à transferência de metais para a cultura.

2.4.2 Influência dos insumos agrícolas no aporte de metais nos agroecossistemas

Os fertilizantes, corretivos de acidez e adubos orgânicos utilizados na agricultura são importantes entradas de metais nos agroecossistemas podendo vir a comprometer o desenvolvimento das plantas, quando em altas concentrações, como também contaminar os alimentos produzidos resultando em riscos à saúde humana (HE et al., 2005; KHAN et al., 2008; PACHURA et al., 2015). Na produção destes insumos é comum o uso de resíduos agropecuários ou industriais. Dentre estes resíduos está a escória de siderurgia que tem sido recomendada e utilizada como corretivo de acidez do solo. Em sua constituição constam metais como ferro e manganês e outros em menores concentrações (NOBILE, 2009; NING et al., 2016). Apesar disso, ainda são escassos os trabalhos que investigam a relação entre o seu uso e o acúmulo de metais em hortaliças. Por outro lado, por promover a elevação do pH do solo, pode contribuir para a redução da solubilidade de alguns metais (KABATA-PENDIAS & ADRIANO, 1995; SPOSITO, 2008; NOBILE, 2009).

A cama de aviário é outro resíduo utilizado na agricultura e que possui grandes quantidades de metais tóxicos ou potencialmente tóxicos como Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Ni e Pb (RAVINDRAN et al., 2017; SOUSA, 2017; SOUZA et al., 2019; PARENTE et al., 2019). Para brássicas como a couve comum e couve flor, são relatadas aplicações de doses que variam de 0,20 kg por planta no plantio (GRISEL & ASSIS, 2015) a até 1,5 kg por planta em aplicações de cobertura (BHERING et al., 2017), o que equivale a mais de 40 Mg ha⁻¹ em cultivos mais adensados, como de 0,60 m (plantas) x 0,60 m (linhas). A utilização desse resíduo tem sido associada ao aumento da contaminação de solos e hortaliças produzidas na Região Serrana do Rio de Janeiro por metais tóxicos (MATOS, 2016; SOUSA, 2017; PARENTE et al., 2019; RIBEIRO, 2019; FRANCO et al., 2020; SOUSA et al., 2020).

Franco et al. (2020) associam o manejo inadequado do solo, a aplicação intensiva de adubação fosfatada e potássica, a adubação orgânica com cama de aviário, e o revelo, como as variáveis que mais influenciaram no enriquecimento e biodisponibilidade de Pb, Cd, Mn, Cu, Zn, Ni em solos de áreas cultivadas com couve-comum na Região Serrana do Rio de Janeiro (FRANCO et al., 2020). Na mesma região e em áreas de produção de couve-comum e tomate, os principais fatores associados à acumulação de metais no solo foram, principalmente, a adubação orgânica com cama de aviário e a elevada influência do relevo e do material de origem (MATOS, 2016; SOUSA, 2017; SOUSA et al., 2020). Em áreas de produção de alface e salsa, os metais Pb, Cd, Cr e Ni apresentaram associação com o aporte antropogênico de metais, sendo Pb por meio de adubação orgânica, e Cd, Cr e Ni por meio dos adubos minerais (RIBEIRO, 2019).

2.4.3 Impactos dos metais na saúde humana

O acúmulo de metais em solos e plantas tem sido motivo de crescente preocupação devido aos riscos potenciais à saúde humana. O consumo de alimentos contaminados é a principal via de entrada desses poluentes tóxicos no corpo humano (KHAN et al., 2008; ZHU et al., 2011; KHAN et al., 2013; YAACOB et al., 2018). A contaminação por metais é capaz de causar vários distúrbios, como instabilidade genômica, problemas endócrinos, neurotoxicidade, carcinogenicidade, problemas imunológicos e também comportamento psicossocial prejudicado (DYER, 2007).

O chumbo (Pb), por exemplo, é responsável por aumentar a pressão sanguínea, infecção tumoral, síntese inadequada de hemoglobina e causar danos ao sistema reprodutivo (COUTO et al., 2018a). Enquanto o cádmio (Cd) pode acumular-se no corpo humano e dar origem a doenças renais, pulmonares, hepáticas, esqueléticas, efeitos no sistema reprodutivo,

e câncer (ZHU et al., 2011). No geral, as crianças são mais sensíveis ao Pb e Cd do que os adultos, e estes efeitos prejudiciais são acumulativos (SHAHEEN et al., 2016).

A deficiência de Mn pode produzir lesões esqueléticas e anormalidades reprodutivas em mamíferos, enquanto altas doses deste elemento produzem efeitos adversos principalmente nos pulmões e no cérebro (ZHU et al., 2011). Altos níveis de Zn podem causar comprometimento do crescimento e da reprodução (NOLAN, 1983). O excesso de Cu pode causar danos ao fígado (JAVED & USMANI, 2016), enquanto altas concentrações de Fe podem provocar danos aos tecidos, como resultado da formação de radicais livres (ZHU et al., 2011).

A avaliação dos riscos causados por estes metais é o processo que infere sobre os efeitos à saúde humana decorrentes da exposição a determinadas doses de um contaminante recebido por uma ou mais vias de exposição (SHAHEEN et al., 2016). O consumo de alimentos contaminados com metais é uma das principais vias de contribuição (mais de 90%) à exposição humana do que quaisquer outras vias, como inalação e contato cutâneo (KHAN et al., 2008; KHAN et al., 2013).

Diferentes agências regulatórias nacionais e internacionais estabeleceram limites máximos de metais como contaminantes em alimentos (UNIÃO EUROPEIA, 2006; ANVISA, 1998, 2013). O regulamento (CE) nº 1881 de 19 de dezembro de 2006 (UNIÃO EUROPEIA, 2006) e a resolução nº 42 de 29 de agosto de 2013 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2013) dispõem sobre os limites máximos de alguns como contaminantes de alimentos. Para chumbo, o valor máximo permitido é de $0,30 \text{ mg kg}^{-1}$ fresco de hortaliças do gênero *Brassica* (incluindo-se as de folhas soltas), hortaliças de folha e ervas aromáticas frescas. Para Cd o valor máximo é de $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$ para hortaliças do gênero *Brassica* (excluindo-se as de folhas soltas); $0,20 \text{ mg kg}^{-1}$ para hortaliças de folhas (incluindo brássicas de folhas soltas), e ervas aromáticas frescas (UNIÃO EUROPEIA, 2006; ANVISA, 2013).

A portaria nº 685, de 27 de agosto de 1998 da ANVISA estabeleceu os limites máximos de tolerância para cobre (Cu) como contaminante. O valor máximo estabelecido é de 10 mg kg^{-1} de frutas e hortaliças *in natura* e industrializadas (ANVISA, 1998). Os metais Fe, Mn, Zn, Ni, Cr e Co não são abordados nestes documentos, o que dificulta a avaliação da qualidade de hortaliças e alimentos consumidos.

Os índices utilizados na avaliação de riscos à saúde por meio da ingestão de alimentos contaminados geralmente envolvem o uso de uma dose oral de referência (D.O.R), e informações como a ingestão diária, peso médio dos indivíduos e tempo de exposição (COUTO et al., 2018a,b).

A D.O.R. representa uma estimativa da exposição diária à qual a população humana pode ser continuamente exposta ao longo da vida sem um risco considerável de efeitos deletérios (KHAN et al., 2013; SHAHEEN et al., 2016). No geral, a maior parte dos estudos utilizam os valores estabelecidos pela United States Environmental Protection Agency (USEPA). As doses de referência comumente utilizadas são 0,0035; 0,001; 0,04; 0,70; 0,14; 0,30; 0,02 e 1,50 mg por kg peso corporal (p.c.) dia^{-1} , para Pb, Cd, Cu, Fe, Mn, Zn, Ni e Cr, respectivamente (USEPA, 2010; KHAN et al., 2013; JAVED & USMANI, 2016; SHAHEEN et al., 2016; ISLAM et al., 2014; FAN et al., 2018).

A ingestão diária estimada (IDE), coeficiente de risco não-cancerígeno (THQ), índice total de perigo (ITP), e o fator de risco cancerígeno (FRC) são os índices comumente utilizados na avaliação dos riscos relacionados ao consumo de alimentos contaminados por metais (KHAN et al., 2008; YANG et al., 2011; JI et al., 2013; ISLAM et al., 2014; SHAHEEN et al., 2016; ANTOINE et al., 2017; YAACOB et al., 2018). A ingestão diária estimada (IDE), expressa em mg kg^{-1} peso corporal dia^{-1} , representa o consumo diário de determinado contaminante, tendo como base a concentração no alimento e os hábitos

alimentares, bem como o peso corporal médio da população-alvo (ISLAM et al., 2014; SHAHEEN et al., 2016; FAN et al., 2018)

O coeficiente de risco alvo não-cancerígeno (THQ) é definido como a razão entre a ingestão diária estimada, comparado a uma dose oral de referência (ANTOINE et al., 2017). Já os valores de índice total de perigo (ITP) indicam o somatório dos riscos à saúde envolvendo todos os metais presentes no alimento. Valores de THQ e ITP superiores a 1 sinalizam riscos aos consumidores (ANTOINE et al., 2017; YAACOB et al., 2018).

O fator de risco cancerígeno (FRC), por sua vez, determina o risco de câncer ao longo da vida aos indivíduos expostos por longo período a uma determinada fonte de contaminação (ISLAM et al. 2014; SHAHEEN et al., 2016; ANTOINE et al., 2017). No geral, são utilizados como norteadores os limites de 10^{-6} e 10^{-4} . Valores de FRC iguais a 10^{-6} e 10^{-4} são equivalentes a 1 caso de câncer a cada 1.000.000 e 10.000 pessoas, respectivamente (SHAHEEN et al., 2016). Os valores de FCR inferiores a 10^{-6} , considerado como um limite limiar, não apresentam riscos evidentes à saúde, enquanto valores superiores a 10^{-4} são considerados inaceitáveis (USEPA, 1989; 2010).

Diante de tais riscos potenciais à saúde humana, estudos que avaliem a influência dos insumos agrícolas e práticas de manejo na contaminação de hortaliças por metais são muito importantes.

Após a explanação teórica sobre as principais vertentes relacionadas ao presente Trabalho de Tese, são a seguir apresentados os trabalhos desenvolvidos para se testar as hipóteses formuladas e se atingir os objetivos propostos. A apresentação destes trabalhos foram divididos em três Capítulos:

Capítulo I – Relação entre práticas de manejo e atributos do solo com a ocorrência da hérnia das crucíferas em couve-comum.

Capítulo II – Estratégias para o controle da hérnia das crucíferas e produção de brócolis em regiões tropicais de agricultura de montanha.

Capítulo III - Metais tóxicos em brócolis pelo uso combinado de corretivos da acidez e cama de aviário em condições tropicais de montanha.

CAPÍTULO I

RELAÇÃO ENTRE PRÁTICAS DE MANEJO E ATRIBUTOS DO SOLO COM A OCORRÊNCIA DA HÉRNIA DAS CRUCÍFERAS EM COUVE-COMUM

RESUMO

A h ernia das crucíferas, causada por *Plasmodiophora brassicae*,   o principal limitante biológico   produ o de couve-comum (*Brassica oleracea* var. *acephala*) e demais espécies de brássicas em todo o mundo. Pouco se conhece sobre os fatores relacionados   ocorrência da doença em áreas de agricultura de montanha e em condi es tropicais. Com isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar a ocorrência da doença em lavouras de couve-comum, identificar potenciais falhas no manejo adotado, e os fatores de solo associados   doença. Um estudo foi conduzido em 24 áreas da Região Serrana do Rio de Janeiro, Brasil. Identificaram-se as práticas de manejo do solo e da cultura adotados, os atributos de solo e do relevo na região, e quantificaram-se a intensidade da doença, os teores e acúmulo de elementos e o acúmulo de biomassa nas plantas. Foram identificadas diversas falhas no manejo como o cultivo sequencial de espécies hospedeiras, baixa adesão às práticas de análise, calagem e conserva o do solo, e uso comunitário de máquinas e implementos sem realiza o de limpeza prévia. A partir de análises multivariadas, comprovou-se que a doença esteve associada, principalmente, aos solos com baixo pH, alta propensão ao acúmulo de água, elevados teores de Al³⁺ e a r izes com elevados teores e acúmulo de alumínio. Para redu o das perdas pela doença na região será necessária a divulga o e ado o de práticas que reduzam a dispersão dos esporos e a prevalência de condi es favoráveis ao processo de infec o e coloniza o pelo patógeno e a melhoria das condi es de fertilidade e desenvolvimento das plantas.

Palavras-chave: *Brassica oleracea* var. *acephala*. *Plasmodiophora brassicae*. Agricultura de montanha. Acidez. Alumínio.

ABSTRACT

Clubroot, caused by *Plasmodiophora brassicae*, is the main biological limiting factor for the production of kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) and other brassica species worldwide. Little is known about the factors related to the occurrence of the disease in mountain farming areas and in tropical conditions. Thus, the objective of this work was to evaluate the occurrence of the disease in common cabbage crops, to identify potential flaws in the management adopted, and the soil factors associated with the disease. A study was conducted in 24 areas in the mountainous region of Rio de Janeiro, Brazil. Soil and crop management practices, disease severity, soil and relief attributes, levels and accumulation of elements, and accumulation of biomass in plants were identified. Several management failures were identified, such as the sequential cultivation of host species, low adherence to analysis, liming and soil conservation practices, and community use of machines and implements without cleaning. From multivariate analysis, it was observed that the disease was mainly associated with soils with low pH, high propensity to accumulate water, high levels of Al^{3+} in the soil, in addition to levels and high accumulation of Al in the roots. Socio-educational measures should be encouraged in the region as a way of reducing losses from the disease, as well as reducing the dispersion of spores from the pathogen.

Keywords: *Brassica oleracea* var. *acephala*. *Plasmodiophora brassicae*. Mountain farming. Acidity. Aluminum.

3. INTRODUÇÃO

A couve-comum ou couve de folha (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*), espécie originária do Mediterrâneo Europeu, é uma hortaliça folhosa de grande valor nutricional e medicinal e muito apreciada na culinária brasileira e mundial (TRANI et al., 2015; SAMEC et al., 2018). No Brasil, a sua produção anual é superior a 161.986 Mg, em geral oriunda de pequenas unidades familiares (IBGE, 2017). A couve-comum, assim como as demais hortaliças da espécie *B. oleracea*, produzem melhor sob temperaturas amenas de 16 a 22° C, sendo a faixa limite de 10 a 28° C para seu crescimento satisfatório. Por isso, no Brasil, seu cultivo o ano todo é restrito a regiões com altitudes maiores que 800 m (TRANI et al., 2015; BHERING et al., 2017; SANTOS et al., 2020a).

Apesar da importância econômica e social e do crescente interesse pela couve, existem poucas pesquisas e dados científicos sobre a cultura no Brasil. A maioria das informações são extrapoladas de pesquisas com outras hortaliças da mesma espécie, como a couve-flor (*B. oleracea* var. *botrytis*) e brócolis (*B. oleracea* var. *italica*), mesmo havendo diferenças quanto ao órgão de interesse, manejo e duração do ciclo. A couve-comum é propagada, predominantemente, por meio de rebentos oriundos de brotações axilares das folhas; apresenta colheitas múltiplas e seu cultivo pode se estender por períodos superiores a um ano (TRANI et al., 2015). No entanto, assim como as demais brássicas, é também suscetível à hérnia das crucíferas, causada por *Plasmodiophora brassicae* Woronin. Esta doença apresenta importância mundial e tem causado perdas médias de produtividade que variam de 10 a 50% (DIXON, 2009b). O agente, *P. brassicae*, é um protozoário habitante de solo, onde sobrevive como esporos de resistência por vários anos. É um fitopatógeno biotrófico, com especificidade a espécies da família Brassicaceae, capaz de infectar e colonizar as raízes, causando galhas, e dificultando a absorção de água e de nutrientes (DIXON, 2014; GOSSSEN et al., 2014; BOTERO et al., 2019).

Apesar de transcorridos 86 anos de seu primeiro relato no Brasil em couve-comum, em São Paulo-SP, no ano de 1934 (VIÉGAS & TEIXEIRA, 1943), ainda são poucas as informações científicas sobre a doença no país (BHERING et al., 2017; SANTOS et al., 2017; BHERING et al., 2020; SANTOS et al., 2020a). A maioria das informações e estratégias de manejo atualmente preconizadas são baseadas em estudos feitos em regiões temperadas, especialmente nas culturas de couve-flor, brócolis e canola (NARISAWA et al., 2005; NIWA et al., 2007; NIWA et al., 2008; DIXON, 2009a,b; PENG et al., 2011; DIXON, 2014; GOSSSEN et al., 2014; GOSSSEN et al., 2015; HWANG et al., 2015; STRELKOV et al., 2020).

A hérnia das crucíferas é uma doença de ciclo complexo e de difícil controle devido à baixa disponibilidade de cultivares resistentes, escassez de opções de produtos para o controle químico, longa sobrevivência do patógeno no solo e a especialização de cultivos em algumas regiões (DONALD & PORTER, 2009; BHERING et al., 2017). A sua intensidade pode ser afetada diretamente pela densidade de esporos de resistência de *P. brassicae* viáveis e pelas características físicas, químicas e biológicas do solo (DIXON, 2009a,b; DONALD & PORTER, 2009; DIXON, 2014; BHERING et al., 2017; BHERING et al., 2020). Baixos pH (<6,2) e baixos teores de Ca^{2+} e alta umidade do solo estão entre os fatores que mais favorecem o processo de infecção e colonização das raízes e as perdas pela doença (WEBSTER & DIXON, 1991a; NIWA et al., 2008; DIXON, 2009a,b; GOSSSEN et al., 2014; SANTOS et al., 2017; SANTOS et al., 2020a).

Em regiões tropicais e de montanha, comparado às áreas de produção em condições de clima temperado, as perdas causadas pela hérnia das crucíferas podem ser agravadas por algumas características singulares como: solos intemperizados, naturalmente ácidos e com altos teores de Al^{3+} tóxico, altas temperaturas e precipitação, possibilidade de cultivo o ano inteiro, e relevo declivoso (BHERING et al., 2017; SANTOS et al., 2017; BOTERO et al.,

2019; SANTOS et al., 2020a), o que favorece a erosão e dispersão de esporos de resistência de *P. brassicae*.

Este estudo foi conduzido na Região Serrana do Rio de Janeiro, uma tradicional região produtora de couve-comum no Brasil, que pratica agricultura familiar e apresenta relatos de perdas frequentes pela hérnia das crucíferas. Dada as singularidades da espécie *B. oleracea* var. *acephala*, e as poucas informações sobre a hérnia das crucíferas em agroecossistemas de montanha em condições tropicais, desenvolveu-se o presente trabalho com os objetivos de: 1) quantificar a incidência e a importância da hérnia das crucíferas em lavouras de couve-comum; 2) identificar os fatores locais e de manejo dos solos e da cultura agrícola predisponentes ao desenvolvimento da doença; 3) identificar fatores relacionados ao relevo e aos atributos químicos do solo que possam estar mais relacionados à ocorrência da doença na cultura e na região.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

O levantamento foi realizado em 24 campos de produção de couve-comum, localizados no município de Petrópolis, na Região Serrana do Rio de Janeiro, Brasil. A região do estudo apresenta histórico de cultivo de brássicas há mais de 30 anos em áreas com alta declividade (Figuras 1a,b), elevado potencial de inóculo de *P. brassicae* no solo (média de 10^6 unidades $g\ solo^{-1}$) (SANTOS et al., 2020a), relatos de ocorrência e perdas frequentes pela hérnia das crucíferas. As lavouras são perpetuadas por meio de propagação vegetativa a partir de clones cultivados há mais de 20 anos e com plantio em espaçamento padrão de 0,5 m x 0,3 m.



Figura 1. Lavouras de produção de couve-comum (*Brassica oleracea* var. *acephala*) na Região Serrana do Rio de Janeiro. Petrópolis, RJ, 2020. Fonte: O autor.

As coletas foram realizadas na primeira quinzena de fevereiro de 2017. O período de verão nesta região é caracterizado por temperaturas mais altas, comparado aos demais períodos do ano, e elevados índices pluviométricos. Os dois últimos meses que antecederam o período da coleta apresentaram temperatura média de $17,4^{\circ}C$, com mínimas e máximas de $7,8^{\circ}C$ e $27,5^{\circ}C$, respectivamente, e pluviosidade acumulada de 580 mm (INMET, 2018).

4.2 Levantamento das práticas de manejo adotadas nas lavouras de couve-comum

Inicialmente, realizou-se um levantamento sobre o histórico de uso das áreas e do manejo adotado em cada um dos 24 campos de produção estudados. Registraram-se os cultivos anteriores à couve-comum; tipo de preparo de solo; origem dos tratores e implementos e limpeza prévia dos mesmos; análises de fertilidade do solo; correção de acidez e adubação; data de plantio; práticas adotadas na cultura; registros de ocorrência de doenças na cultura; e manejo de restos culturais (Apêndice A). Os dados obtidos foram tabulados, identificadas as variações de respostas e calculadas as porcentagens em relação ao total das amostras utilizando-se o *software* SigmaPlot Versão 10[®].

4.3 Coleta, avaliações e processamento de amostras de couve-comum e de solo

Nestas mesmas áreas, coletaram-se ao acaso amostras de solo e de plantas, seguindo a proporção de uma amostra (solo + planta) para cada 1000 indivíduos, totalizando 146 pontos amostrados em toda a região de estudo (Figura 2). Estes pontos foram elegidos ao acaso, de forma espacialmente distribuída dentro da mesma área e considerando-se caminhamento em zigue-zague desde o ponto mais alto ao mais baixo de cada área. As plantas amostradas apresentavam características compatíveis com a população da área. Cada ponto de coleta foi georreferenciado com a utilização de um GPS topográfico (marca Garmin, modelo Montana TM 650) e as coordenadas medidas em UTM (Universal Transversa de Mercator).

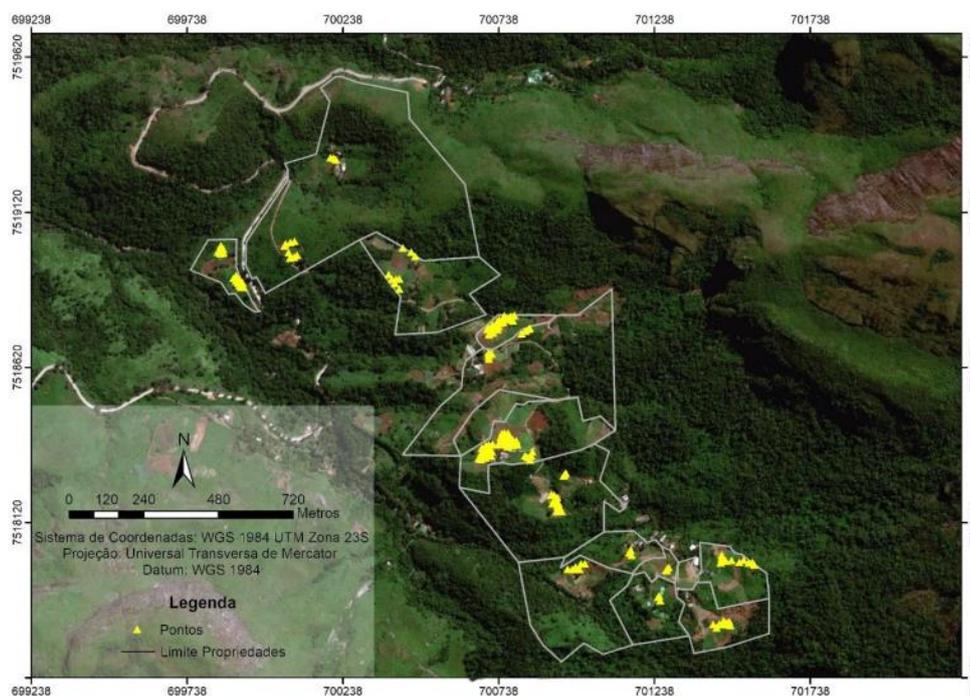


Figura 2. Pontos amostrados em lavouras de produção de couve-comum (*Brassica oleracea* var. *acephala*) na Região Serrana do Rio de Janeiro. Petrópolis, RJ, 2020. Elaborado por: Guimarães, L.D.D.

Em cada ponto amostral, coletou-se uma planta efetuando-se um corte rente na base do caule, seguindo-se a sua identificação e embalagem. Em seguida, com auxílio de uma pá reta, coletou-se o bloco de solo mais as raízes correspondentes à planta. Uma vez removido o bloco, estes foram transportados até laboratório onde procedeu-se a uma cuidadosa separação das raízes e do solo, assim como o processamento da parte aérea das plantas.

Nas amostras vegetais, determinaram-se a massa fresca do caule e das folhas, o número de folhas e de cicatrizes foliares no caule. As raízes foram lavadas e, em seguida, avaliadas individualmente para determinação do volume e massa fresca da fração sadia das raízes (VRS, MFRS, respectivamente) e da fração do volume e massa fresca correspondente às hérnias (VH; MFRH; respectivamente) (BHERING et al., 2017). O volume (VTR) e massa fresca (MFRT) total das raízes foram determinados pelo somatório do volume e da massa das raízes sadias e das hérnias. Com base nestes valores, determinaram-se as porcentagens de raízes com hérnias expressas em volume ($PVRH=VH.VTR^{-1}.100$) e em massa fresca ($PMFRH=MFRH.MFRT^{-1}.100$).

As amostras de folhas, caule, e raízes foram secas em estufa de circulação de ar, a 65 °C, até alcançar massa constante para obtenção dos respectivos valores secos. Os valores

acumulados de massa seca na planta (MSPL) foram obtidos pelo somatório das massas secas dos respectivos órgãos. As massas secas das folhas produzidas deste o plantio até a coleta foi estimada com base nos produtos entre massa seca média das folhas amostradas e o número de cicatrizes foliares contabilizados no caule das plantas.

As amostras secas foram moídas e usadas para determinação dos teores de Ca, Mg, P, K e Al. Para tanto, tomaram-se alíquotas de 1,0 g de amostras dos respectivos órgãos de cada planta que foram submetidas ao processo de digestão aberta em blocos digestores utilizando-se ácido nítrico conforme método 3050 (USEPA, 2008). Os teores totais de Ca, Mg e Al foram determinados em espectrofotômetro de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). Os teores de K foram determinados por espectrometria de emissão de chama e os de P por colorimetria de metavanadato (MALAVOLTA et al., 1997). A qualidade das análises foi realizada utilizando-se amostra certificada 1573a Tomato Leaves (certificada pelo National Institute of Standards and Technology, NIST, 1995). Tendo como base os teores encontrados nas raízes, caules e folhas e na massa seca, foram calculados os valores acumulados nos respectivos órgãos e na planta (PL).

As amostras individuais de solo foram preparadas e analisadas conforme Donagemma et al. (2011) visando a determinação de: pH (em água), Ca, Mg e Al trocáveis ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), K trocável (mg dm^{-3}), P assimilável (mg dm^{-3}), acidez potencial (H+Al) expressa em $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, capacidade de troca catiônica – CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), saturação por bases - V (%), e teor de matéria orgânica – MO (g kg^{-1}).

4.4 Análise dos dados

Com os dados georreferenciados de cada ponto de coleta, elaborou-se o mapa digital de elevação e o de declividade das áreas (Slope) utilizando-se o programa ArcMap 10.1 do pacote do sistema de informação ArcGis. Determinou-se também o índice de fluxo de drenagem (TWI) por meio do programa SAGA 2.5.

Os dados de ocorrência de hérnia das crucíferas, fertilidade do solo, relevo, acúmulo de biomassa, e teores e acúmulo de elementos nas plantas foram submetidos à análise multivariada. Realizou-se análise de componentes principais (PCA), agrupamento, e validação cruzada na análise discriminante utilizando o *software* R (R Core Team, versão 3.4.4). Na PCA, para minimizar o efeito de autocorrelação, as variáveis altamente correlacionadas foram removidas da análise, sendo mantidas aquelas que apresentaram os maiores coeficientes de correlação com a doença.

As amostras foram agrupadas considerando-se os atributos de fertilidade do solo. Para isso, utilizou-se a distância Euclidiana como medida de similaridade, e o método hierárquico de Ward como algoritmo de agrupamento. O número de grupos ótimos foi feito considerando 1,25 vezes o desvio padrão da distância de ligação de todas as observações (MILLIGAN & COOPER, 1985). No entanto, o resultado proveniente foi submetido à validação cruzada na Análise Discriminante, de forma a avaliar a taxa de erro geral da distribuição das amostras. Os dados dos grupos foram submetidos à análise descritiva (valores médios, desvio padrão, máximos e mínimos), padronizados considerando média 0 e variância 1, e plotados em gráfico utilizando-se o *software* Microsoft® Office Excel®.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Manejo da couve-comum

Identificou-se que, na maioria das áreas investigadas, a couve-comum ou o brócolis são as culturas predominantes há mais de 20 anos, com inserção eventual de outras hortaliças diversas. A alface (*Lactuca sativa* L.) (38%) e o coentro (*Coriandrum sativum* L.) (24%) foram as hortaliças mais frequentemente citadas como culturas complementares ou que antecederam as lavouras de couve-comum estudadas. Ainda, em 14,3% das áreas, a lavoura de couve foi antecedita pela própria couve-comum ou por brócolis, ou seja, por espécies hospedeiras de *P. brassicae* (Figura 3).

O intervalo de tempo entre a última brássica colhida em cada área e a introdução da nova lavoura de couve-comum variou de 6 meses a 8 anos, e com média de 2,5 anos. Em 100% dos casos, a hérnia das crucíferas foi citada como a principal doença das lavouras de couve-comum ou de brócolis seguida da podridão-mole (*Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*). Esta situação está diretamente relacionada à especialização dos agricultores locais em produzir couves, com reduzida diversificação ou período de rotação com outras espécies. Sabe-se que *P. brassicae* possui habilidade em sobreviver como esporos de resistência por até 18 anos, e com uma meia-vida de 3,6 anos no solo (DIXON, 2009b; DONALD & PORTER, 2009; DIXON, 2014). Este problema se agrava com o manejo inadequado dos restos culturais ao final do ciclo da couve - incorporação dos resíduos, inclusive das raízes contendo galhas da hérnia das crucíferas. Em apenas 26% dos casos foi relatada a prática de arranquio das plantas, remoção e exposição ao sol em local isolado da lavoura (Figura 3).

Esta especialização e os cultivos frequentes de couve nas mesmas áreas tem garantido a sobrevivência do patógeno nas áreas. Associado a isso, predominam práticas que favorecem a dispersão dos esporos, como o uso compartilhado de tratores e implementos agrícolas (78,2% das áreas). Estes equipamentos, em geral, não são limpos ou higienizados após o uso, ou antes de seu uso em área seguinte (52,94%) (Figura 3). O preparo do solo é feito, predominantemente, a favor da pendente, com o uso de arado ou enxada rotativa, e sem a adoção de práticas conservacionistas, o que pode estar contribuindo para a dispersão dos esporos de resistência do patógeno. Estas condições, juntamente com a irrigação comumente feita por aspersão, favorecem os processos erosivos, a perda de nutrientes, e a dispersão de esporos de resistência de *P. brassicae* pelo arraste de solo e escoamento de água contaminados (DONALD & PORTER, 2009; GOSSSEN et al., 2014; BHERING et al., 2017).

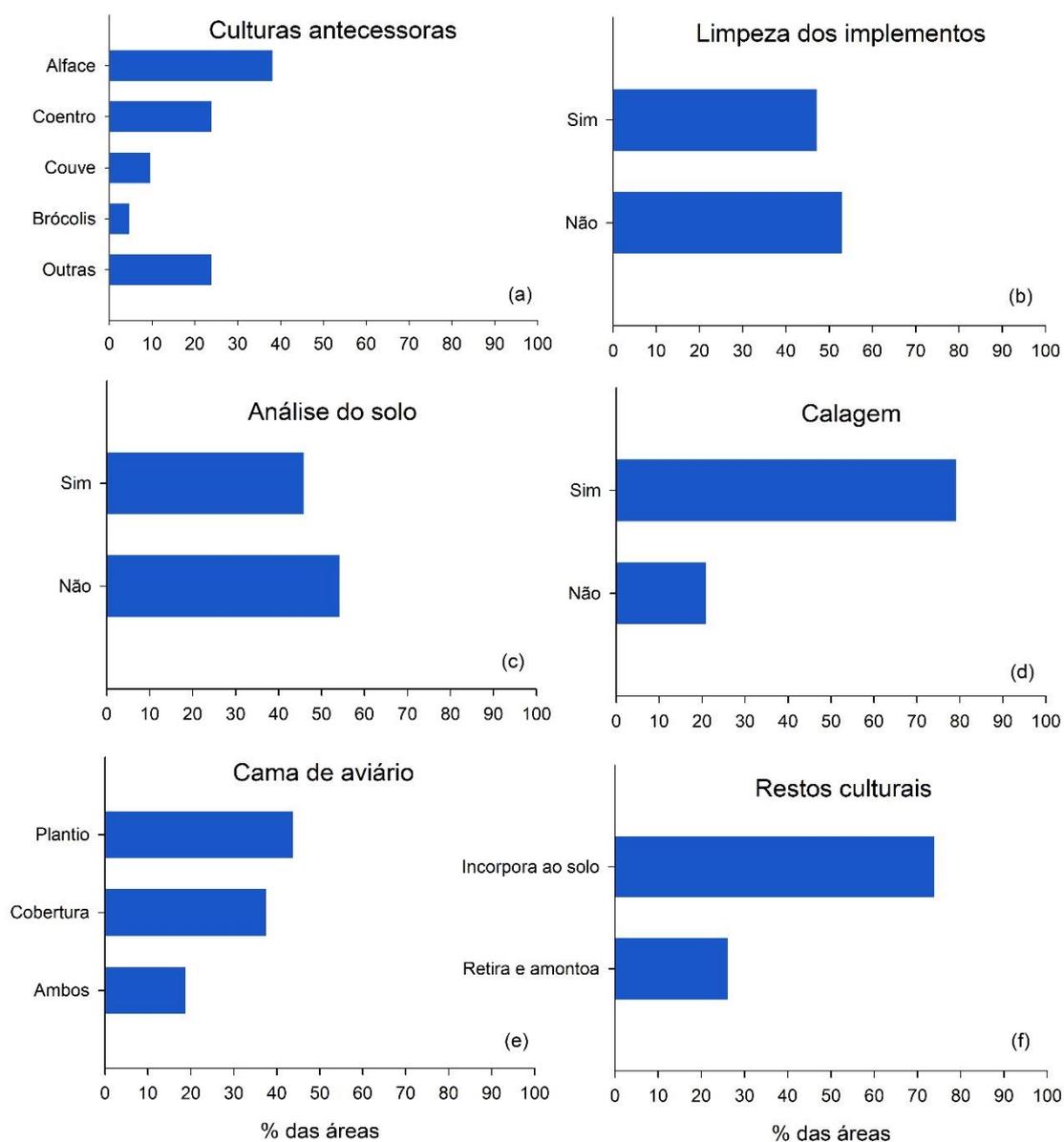


Figura 3. Resultado da pesquisa com produtores em 24 áreas de produção de couve-comum (*Brassica oleracea* var. *acephala*) da região de Petrópolis-RJ (Brasil), com dados expressos em porcentagem das unidades produtivas amostradas, sendo: a) culturas antecessoras a couve-comum; b) realização de limpeza dos tratores e implementos utilizados na lavoura; c) realização de análise de solo na área; d) realização de calagem na área; e) épocas de aplicação de cama de aviário; f) destino dos restos culturais.

Além da sobrevivência e da dispersão dos esporos de resistência do patógeno, favorecidas pelas práticas citadas acima, constatou-se também possível efeito condutivo das características químicas dos solos, principalmente relacionadas à acidez e baixos níveis de Ca^{2+} . Apesar da realização da calagem ser citada na maioria das lavouras (79%) (Figura 3), esta prática provavelmente não seguiu critérios técnicos, visto a não realização rotineira de análise de fertilidade dos solos, relatado em 54% dos casos. Quando realizada, as aplicações de calcário foram feitas a lanço seguidas de incorporação superficial ao solo com enxada rotativa, porém em período variável de 2 dias a 3 meses antes do transplante das mudas de couve-comum. As calagens, quando feitas, antecedem de 2 a 16 meses à coleta das amostras nesse estudo.

Identificou-se também como praxe local, a utilização de cama de aviário para adubação, em 96% dos casos. Na grande maioria das lavouras, esta adubação foi feita nas covas de plantio (63,5%), na ocasião do transplantio das mudas e sendo, em 18,8% dos casos, também repetida em adubações de cobertura a cada dois meses. Em 37,5% dos casos a aplicação da cama de aviário foi relatada apenas nas adubações de cobertura (Figura 3). A dose de cama de aviário utilizada foi estimada em 400 g planta⁻¹ (26,6 Mg ha⁻¹). Além da adubação orgânica, 96% das lavouras foram também adubadas com fontes minerais de NPK, no transplantio e em cobertura (45,5% dos casos), ou somente em cobertura em 54,54% dos casos. As adubações minerais em cobertura seguiram um mesmo padrão, com aplicação de cerca de 10 g planta⁻¹ de formulação comercial a base de NPK (4-14-8), a cada 15-20 dias, por ocasião da colheita de folhas para comercialização. Nos demais casos identificou-se a realização de adubação com uso de torta de mamona ou bokashi (4,0%). Na ocasião das adubações de cobertura, também são comumente realizadas amontoa de terra na base do caule das plantas.

5.2 Ocorrência da hérnia das crucíferas e características gerais dos atributos do solo

Identificou-se a presença de plantas com hérnia das crucíferas em 75% das lavouras e em 26,71% das plantas avaliadas, confirmando estar o patógeno amplamente distribuído na região. A severidade média da doença, calculada com base na porcentagem do volume de raízes com hérnia (PVRH), variou de 2,56 a 66,66% e com valores médios de 2,20%. Estes valores de severidade, no entanto, são inferiores aos valores médios (66,0%) registrados na cultura da couve-flor (*B. oleracea* var. *botrytis*) por Bhering et al. (2017) e Santos et al. (2017).

Apesar dos relatos de realização de calagem na maioria das áreas (Figura 3), os solos das respectivas áreas apresentaram-se ácidos (pH médio de 5,37), com elevada acidez potencial (8,79 cmol_c dm⁻³) e baixa saturação por bases (V%) (média = 48,26%) (Tabela 1). Este resultado deve-se, provavelmente à não observação de critérios técnicos para cálculos das doses de corretivos de solo, visto à não realização de análise de fertilidade (54,1%). A data de realização da calagem, principalmente na ocasião do transplantio das mudas, também compromete a eficiência da reação do calcário no solo. Estas condições, além de inadequadas para o cultivo de couve-comum e demais espécies de *Brassica* spp. (FREIRE et al., 2013; TRANI et al., 2015; BHERING et al. 2017), são favoráveis à hérnia das crucíferas (DIXON, 2009a,b; BHERING et al., 2017; BHERING et al., 2020). Por outro lado, os teores médios de P assimilável e K trocável registrados no solo foram muito elevados (Tabela 1) (FREIRE et al., 2013), o que provavelmente está relacionado ao uso massivo de cama de aviário e adubos minerais (SOUSA et al., 2020) sem embasamento em laudos prévios de fertilidade, dada a baixa adesão à análise química do solo.

Tabela 1. Média, desvio padrão (DP), e valores mínimos e máximos de pH, teores trocáveis de Ca, Mg, e K no solo, acidez potencial (H+Al), capacidade de troca catiônica (CTC), teor assimilável de P, saturação por bases (V) e matéria orgânica (MO) referentes às amostras coletadas em 24 áreas de produção de couve-comum.

	pH	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	K	P	V	MO	
	(água)										
				cmol _c dm ⁻³			mg dm ⁻³		%		
Média	5,37	3,81	3,06	0,10	8,79	16,50	309,24	80,30	48,26	2,74	
DP	0,41	1,65	1,33	0,16	3,92	3,02	366,51	79,01	16,88	1,60	
Mínimo	4,19	0,60	0,10	0,00	1,65	8,84	17,39	1,50	9,63	0,64	
Máximo	6,79	7,90	8,10	0,80	18,65	24,61	1727,53	483,51	81,34	6,50	
Favorável a hérnia ^a	<6,20	<5,50	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	
Recomendado para a cultura ^b	6,50	3,00	0,90	<0,3	n.e.	n.e.	135,00	30,00	80,00	3,44	

^a Webster & Dixon (1991a); Dixon (2009a,b); Donald & Porter (2009); Bhering et al. (2017). ^b Freire et al. (2013); Trani et al. (2015). n.e. Não Estabelecido.

Nas folhas, os teores registrados para Ca (15,36 a 127,37 g kg⁻¹ de matéria seca, média de 51,53 g kg⁻¹), Mg (3,61 a 16,60 g kg⁻¹, média de 8,55 g kg⁻¹), e K (23,60 a 87,76 g kg⁻¹, média de 47,30 g kg⁻¹) foram considerados elevados (Trani et al., 2015), provavelmente em função das elevadas doses de fertilizantes aplicados e das práticas de manejo anteriormente reportadas. Os teores de P variaram de 4,46 a 13,93 g kg⁻¹, (média de 8,81 g kg⁻¹), enquanto os teores de N nas plantas não foram quantificados nesse estudo. Trani et al. (2015) consideram como normais na cultura da couve-comum as seguintes variações de macronutrientes: Ca, de 15 a 25 g kg⁻¹; Mg de 3 a 7 g kg⁻¹; P de 20 a 40 g kg⁻¹; K igual a 37 g kg⁻¹.

5.3 Intensidade da hérnia das crucíferas x atributos do solo e relevo

A relação entre a intensidade da doença e os atributos do solo e relevo foi demonstrada nas análises de componentes principais (ACP). As componentes PC1 + PC2, calculadas com base no volume de raízes com hérnia (%) (PVRH), índice de fluxo de drenagem (TWI), pH e teores de matéria orgânica (MO), de Ca²⁺ e Al³⁺ no solo, explicaram 53,14% das variações observadas. A PVRH esteve relacionada direta e positivamente com TWI, que indica o fluxo de drenagem e maior possibilidade de acúmulo de água e possivelmente, acúmulo de esporos de resistência de *P. brassicae*. A PVRH apresentou relação inversa com o pH e teores de Ca²⁺ e MO do solo. Estes três atributos de solo, por sua vez, foram inversamente relacionados aos teores de Al³⁺ no solo (Figura 4a).

Estes resultados confirmam a relação entre a intensidade da doença e a acidez do solo e a classificação dos solos da região como muito favoráveis ao desenvolvimento da doença. Isto é, alta acidez, com pH igual a 5,4±0,4 (Tabela 1) (WEBSTER & DIXON, 1991a; DIXON, 2009a,b; DONALD & PORTER, 2009) e com níveis baixos de Ca²⁺ (3,81±1,6 cmol_c dm⁻³) (NIWA et al., 2008; BHERING et al., 2017; SANTOS et al., 2017; SANTOS et al., 2020a). A maior umidade do solo em posições do relevo mais propensas ao acúmulo de água (>TWI) também é um fator propício às infecções das raízes por *P. brassicae*. A presença de filme de água possibilita maior movimentação dos zoósporos no solo (DIXON, 2009b; DIXON, 2014; GOSSSEN et al., 2014). Estes pontos também estarão mais propensos ao

acúmulo de esporos de *P. brassicae* provenientes de lavouras dos pontos mais altos da paisagem e aderidos a partículas de solo resultantes de processos erosivos.

As componentes PC1 + PC2 que envolveram as relações existentes entre a massa fresca de raízes com hérnia (MFRH) e os teores de macronutrientes (P, K, Ca e Mg) e de Al nas raízes explicaram 57,08% da variação observada (Figura 4b). Nesta, observou-se relação estreita e positiva da MFRH com o teor de Al nas raízes (AIR), e inversa com os teores de P, K, Ca e Mg nas raízes (PR, KR, CaR, MgR, respectivamente) (Figura 4b). Estes resultados, possivelmente, se deram pelo efeito positivo do baixo pH sobre a intensidade da doença e solubilidade do Al^{3+} , e inversa sobre a disponibilidade dos macronutrientes.

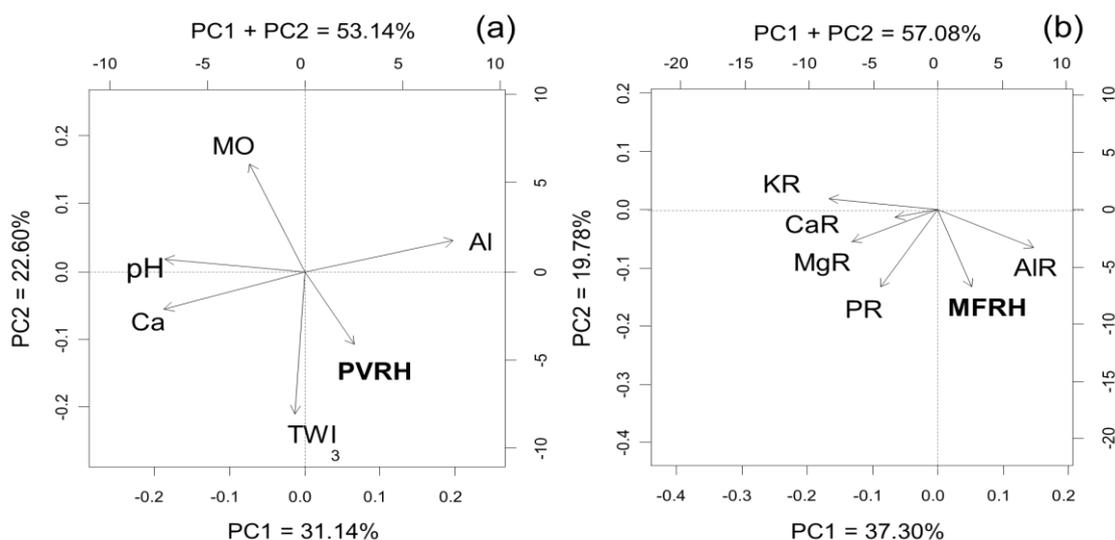


Figura 4. Análise de componentes principais (ACP) relativas à intensidade da hérnia das crucíferas (*Plasmodiophora brassicae*) em couve-comum (*Brassica oleracea* var. *acephala*). (a): porcentagem de hérnias nas raízes (PVRH) x atributos do solo [pH, teores de cálcio (Ca) e alumínio (Al) trocáveis, e matéria orgânica (MO)] x índice de fluxo de drenagem (TWI); (b): massa fresca das hérnias nas raízes (MFRH) x teores de alumínio (AIR), cálcio (CaR), magnésio (MgR), potássio (KR) e fósforo (PR) nas raízes.

A acidez do solo aumenta a solubilidade do Al^{3+} , característica comum em solos de regiões tropicais (FREIRE et al., 2013; BHERING et al., 2017; BOTERO et al., 2019; BHERING et al., 2020), e causa consequente efeito fitotóxico às raízes (MEURER & ANGHINONI, 2010). Este elemento tóxico tem sua solubilidade aumentada em $pH < 5,5$ (FREIRE et al., 2013; SANTOS et al., 2017; SANTOS et al., 2020a), podendo causar inibição da divisão celular das raízes e prejuízos ao seu alongamento e crescimento, além de redução da absorção de água e de nutrientes (CLUNE & COPELAND, 1999; MEURER & ANGHINONI, 2010). Em adição a este efeito, especula-se uma possível ação do Al^{3+} como potencializador das perdas de raízes ativas de *Brassica* spp. ao atuar como um limitante químico, associado à limitação biológica causada por *P. brassicae* (BHERING et al., 2017; BHERING et al., 2020).

A intensidade da doença, expressa pela massa fresca das hérnias (MFRH), se relacionou com os teores de K (KR) e de P (PR) e positivamente com o teor de Al nas raízes (AIR) (Figura 4b). Na literatura, o K em altas concentrações tem sido associado ao aumento da resistência de plantas a doenças (ZAMBOLIM & VENTURA, 2012). Altas concentrações de K e P poderiam também levar ao aumento da espessura da parede celular e criar uma

barreira mecânica à infecção por patógenos (ZAMBOLIM & VENTURA, 2012). No entanto, o conhecimento sobre a interação desses macronutrientes e o estabelecimento e expansão de *P. brassicae* nas raízes de *Brassica* spp. ainda é incompleto (DONALD & PORTER, 2009).

A análise de agrupamento permitiu a identificação de 10 grupos (Figura 5). No entanto, após a realização da validação cruzada na análise discriminante, optou-se pela divisão das amostras em três grupos em função da menor taxa geral de erro (2,26%).

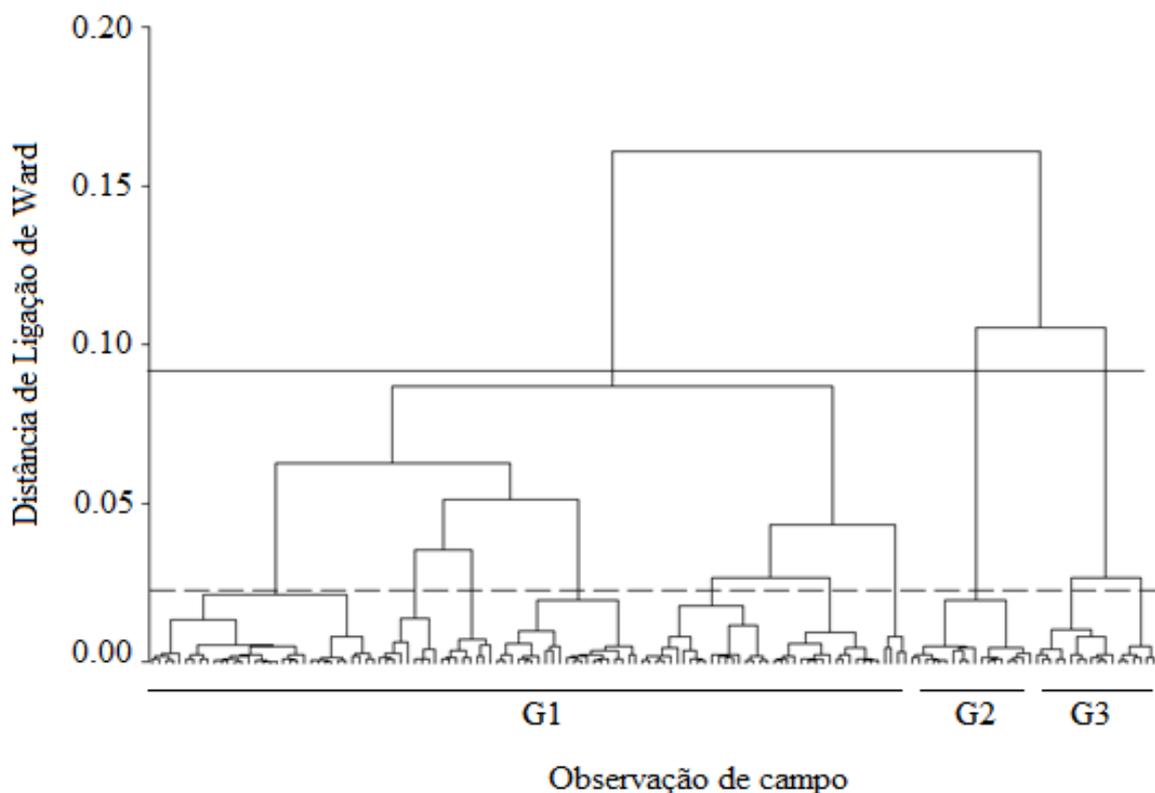


Figura 5. Dendrograma relacionado à análise de agrupamento dos pontos amostrados com base nos atributos de fertilidade do solo e estabelecido por meio da distância Euclidiana e método de Ward.

No grupo 1 (G1) foram alocadas 110 amostras, no grupo 2 (G2), 18 amostras e, no grupo 3 (G3), 17 amostras, representadas pela plotagem das médias padronizadas, considerando média 0 e variância 1 (Figura 6). Estes três grupos (G1, G2 e G3) apresentaram características distintas quanto à intensidade da doença, fertilidade do solo, relevo, biomassa das plantas, teor de Ca, Mg, P, K e Al nas raízes, e acúmulo de elementos nas plantas.

O grupo 1 (G1) contém as amostras de solos de melhor fertilidade (maior pH, maiores teores de Mg^{2+} , P assimilável e MO; menor Al^{3+} e H+Al) e de maior declividade (Slope). Este grupo também apresenta plantas com maior teor de K (KR), menor teor (AIR) e acúmulo (ALAR) de alumínio nas raízes, e menor porcentagem de galhas causadas por *P. brassicae* nas raízes (PVRH) (Figura 6). As plantas de couve desse grupo apresentavam valores médios de idade de 5,72 meses.

No grupo 2 (G2) foram agrupados os pontos com maior severidade da hérnia das crucíferas, expressos em PVRH, além de apresentarem condições inferiores de fertilidade do solo, maior idade das plantas, e relevo mais propenso ao acúmulo de água, expresso pelo TWI (Figura 6). Portanto, o grupo teve como característica o baixo pH do solo, baixos teores de Mg^{2+} , P assimilável, e MO no solo, menor declividade (Slope) e teores de Mg (MgR) e

potássio (KR) nas raízes. Em função da maior idade (10,39 meses), as plantas deste grupo apresentaram os maiores valores de massa seca e acúmulo de nutrientes (Figura 6).

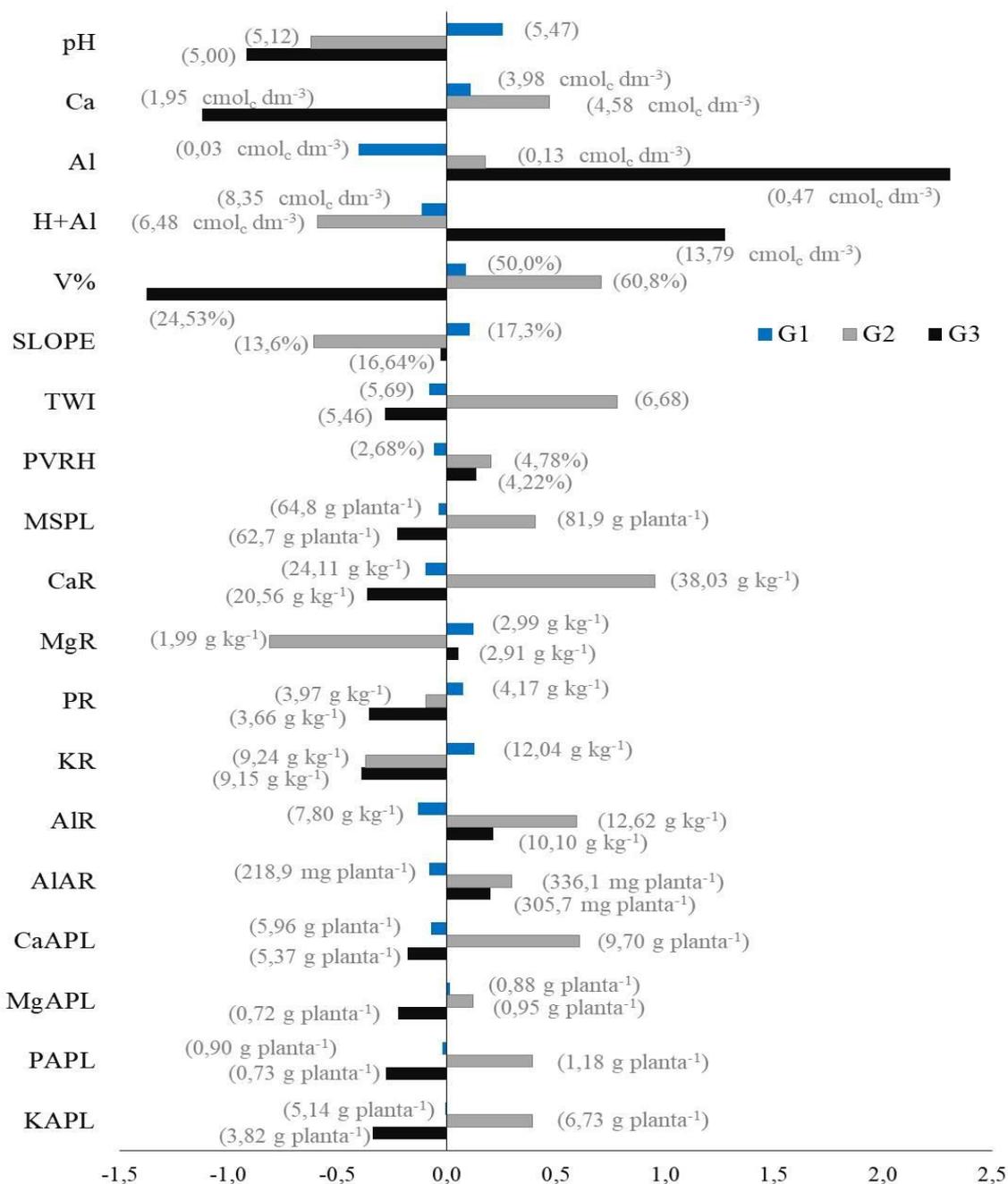


Figura 6. Médias padronizadas para atributos relacionados à fertilidade do solo [pH em água, cálcio (Ca) e alumínio (Al) trocáveis, acidez potencial (H+Al), e saturação por bases (V%)]; relevo [declividade (Slope) e índice de fluxo de drenagem (TWI)]; porcentagem de galhas da hérnia das crucíferas causada por *Plasmodiophora brassicae* nas raízes (PVRH); massa seca das plantas (MSPL); teores de cálcio (CaR), magnésio (MgR), fósforo (PR), e potássio nas raízes (KR); acúmulo de alumínio nas raízes (AIAR) e acúmulo de cálcio (CaAPL), magnésio (MgAPL), fósforo (PAPL), e potássio (KAPL) nas plantas; considerando-se os 3 grupos (G1, G2 e G3) formados a partir da análise de agrupamento das amostras coletadas em áreas de produção de couve-comum.

O grupo 3 (G3) apresentou plantas com alta severidade da doença, próxima ao registrado no G2. No G3 foram registradas características do solo favoráveis à doença como o baixo pH (DIXON, 2009a,b; GOSSSEN et al., 2014; BHERING et al., 2017), além de baixa fertilidade geral apresentando alta acidez potencial (H+AL), altos teores de Al no solo e nas raízes, e elevado acúmulo de Al nas raízes (Figura 6).

No G3, a média de idade das plantas era de 5,61 meses, isto é, valores bem próximos aos encontrados nas plantas do G1. A existência de compatibilidade etária viabiliza a realização de comparações diretas entre o G1 e G3, e também por nesses grupos os atributos de solo e de ocorrência da doença terem sido claramente contrastantes. No G3 foram observados os menores valores de pH, Ca^{2+} , e saturação por bases (V%) no solo (Figura 6); menor acúmulo de biomassa; baixos teores de macronutrientes nas raízes e menor acúmulo de macronutrientes nas plantas (Figura 6). Nesta situação, a presença de maior volume de raízes com hérnias, assim como menor pH e altas concentrações de Al^{3+} no solo podem ter interferido no processo de absorção e acúmulo de nutrientes (BHERING et al., 2017).

Os resultados da análise de componentes principais e de caracterização dos grupos de amostras evidenciam uma relação estreita entre o pH e elementos do solo sobre a ocorrência da hérnia das crucíferas em couve-comum. O aumento da severidade da doença esteve associado aos solos com baixo pH (Figura 4 e 6). De forma semelhante ao estudo realizado por Bhering et al. (2017), realizado em condições edafoclimáticas similares, também foi observada relação estreita e positiva entre valores elevados de alumínio no solo, e do teor e acúmulo deste elemento nas raízes, com a severidade da hérnia das crucíferas (Figuras 4 e 6). Estes resultados sinalizam a existência de interações evidentes entre *P. brassicae* x Al^{3+} que necessitam serem individualizadas em ensaios futuros, em condições controladas.

Os solos da região estudada foram categorizados como predominantemente ácidos (Tabela 1), conforme discutido anteriormente, sendo favoráveis para o ciclo de *P. brassicae* (DIXON, 2009b; GOSSSEN et al., 2014; BHERING et al., 2017) e desfavoráveis ao cultivo de brássicas (Tabela 1) (TRANI et al., 2015). O manejo inadequado do solo e da cultura comumente adotada na região, como negligências quanto à análise, correção da acidez e conservação dos solos pode estar potencializando esta situação (Figura 3).

O manejo e controle da hérnia das crucíferas em lavouras de couve-comum, em áreas tropicais de agricultura de montanha, apresenta-se, a princípio, mais complexo do que para outras hortaliças de ciclo curto do gênero *Brassica*. As plantas de couve-comum possuem longos períodos de cultivo que se estendem por mais de 1 ano no campo (TRANI et al., 2015). Com isso, nas lavouras onde a correção inicial da acidez do solo não seja feita de forma adequada, dificilmente poderá ser ajustada ao longo do ciclo da cultura. Sabe-se que a aplicação de calcário no solo requer homogeneização e período de tempo ideal para a completa reação no solo e que, no geral, deve ser igual ou superior a 3 meses, a depender das condições do solo, umidade e tipo de corretivo utilizado (SANTOS et al., 2017). Em condições declivosas, como as observadas na região (Figura 2), a correção adequada da acidez do solo pode ser dificultada (BHERING et al., 2020). Nessas condições, pode ser preconizada a aplicação prévia de calcário (≥ 3 meses) homogeneizado nas futuras covas de plantio por ocasionar efeitos similares à aplicação à lanço distribuída em toda a área (SANTOS et al., 2020a).

Diferente de outras variedades botânicas de *B. oleracea* como a couve-flor e o brócolis, a propagação da couve-comum é feita, predominantemente, por meio de rebentos oriundos de brotações axilares das folhas (TRANI et al., 2015). Em cada adubação de cobertura, são frequentes a realização de amontoa de terra na base do caule. Esta prática estimula a emissão de raízes adventícias o que, provavelmente, poderia compensar as perdas de raízes pela hérnia e favorecer a sobrevivência e/ou maior longevidade das plantas.

As características químicas do solo, relevo declivoso, acentuada dispersão dos esporos e de resistência de *P. brassicae*, e falhas recorrentes no manejo das lavouras têm exercido, portanto, múltiplos efeitos negativos sobre a produção de couve-comum na região. A viabilidade da produção na região estudada pode estar sendo sustentada pela aplicação massiva de adubos orgânicos e minerais e, provavelmente, as contínuas amontoas e renovação das raízes. A cama de aviário foi citada como o insumo utilizado em maior quantidade nas lavouras da região (BHERING et al., 2017; BHERING et al., 2020; SOUSA et al., 2020). Esta fonte orgânica de nutrientes apresenta como vantagens a grande disponibilidade na região, o baixo custo e a presença de macro e micronutrientes como N, P e K (ROGERI et al., 2016). No entanto, como também contém metais tóxicos, a sua aplicação massiva precisa ser reavaliada (SOUSA et al., 2020).

6. CONCLUSÕES

A hérnia das crucíferas está presente e amplamente disseminada nas lavouras de couve-comum da região estudada.

A especialização dos cultivos, incorporação de restos culturais, reduzido período de rotação com não hospedeiras, baixa adesão à análise e correção do solo, compartilhamento de tratores e implementos, e manejo que favorece os processos erosivos, podem estar colaborando para o aumento da sobrevivência e dispersão de esporos de *P. brassicae* e aumento da ocorrência da doença na região.

As condições locais de relevo, elevada taxa de precipitação pluviométrica, solos ácidos e com alto teor de Al^{3+} , e áreas mais propensas ao acúmulo de água ($>TWI$), influenciam na ocorrência da hérnia das crucíferas em plantas de couve-comum cultivadas em áreas de agricultura de montanha em condições tropicais.

CAPÍTULO II

ESTRATÉGIAS PARA O CONTROLE DA HÉRNIA DAS CRUCÍFERAS E PRODUÇÃO DE BRÓCOLIS EM REGIÕES TROPICAIS DE AGRICULTURA DE MONTANHA

RESUMO

A produção de brócolis, uma das hortaliças mais consumidas no mundo, pode ser negativamente impactada pela hérnia das crucíferas (*Plasmodiophora brassicae*) em várias regiões do Brasil e de outros países. Em função das lacunas no conhecimento existentes sobre o manejo da hérnia das crucíferas e de como viabilizar o cultivo de brócolis em áreas com histórico da doença, especialmente em condições tropicais e montanhosas, desenvolveu-se o presente trabalho. Nestas condições mencionadas, avaliaram-se estratégias de manejo visando aumentar o rendimento da cultura de brócolis e reduzir as perdas causadas pela doença. Realizaram-se dois ensaios em áreas com histórico de perdas pela hérnia das crucíferas. No primeiro, avaliaram-se a incorporação de quatro tipos de pré-cultivos (adubação verde), coentro (*Coriandrum sativum*), crotalária (*Crotalaria juncea* L.), milho-doce (*Zea mays* L.) e vegetação espontânea, associadas ao uso de mudas de brócolis de diferentes tamanhos. No segundo, avaliaram-se o uso de corretivos, calcário e escória de siderurgia, associados à aplicação de cama de aviário, fresca ou compostada por 45 dias, e tratamento sem cama de aviário. Avaliaram-se, em ambos os ensaios, a intensidade da doença, o desenvolvimento das plantas - crescimento radicular, acúmulo de biomassa e de nutrientes e a produtividade. A incorporação da biomassa da crotalária e do coentro favoreceu o aumento do sistema radicular sadio e o acúmulo de biomassa nas plantas de brócolis. A utilização de mudas maiores (célula de 35 cm³ e idade de 28 dias) e (célula de 50 cm³ e idade de 32 dias), em períodos favoráveis à doença resultou em menor intensidade da hérnia das crucíferas, maior desenvolvimento das plantas e maior produtividade de brócolis. A aplicação de escória de siderurgia proporcionou correção da acidez do solo e crescimento das plantas equivalente ao obtido com a aplicação de calcário, mas não afetou a intensidade da doença. A aplicação de cama de aviário, fresca ou compostada por 45 dias, aumentou a intensidade da hérnia das crucíferas mas não afetou a produção de brócolis. Com base nos resultados, conclui-se que, sob condições favoráveis à hérnia das crucíferas, a aplicação de cama de aviário deve ser reavaliada e que corretivos de acidez rico em silicatos não diferem do calcário. Por outro lado, medidas simples como adubação verde com algumas espécies como coentro ou crotalária e, principalmente, o uso de mudas mais bem desenvolvidas, reduzem as perdas pela doença.

Palavras-chave: *Plasmodiophora brassicae*. *Brassica oleracea* var. *italica*. Adubação verde. Escória de siderurgia. Compostagem.

ABSTRACT

Broccoli is one of the most consumed vegetables in the world, and its production can be negatively affected by clubroot (*Plasmodiophora brassicae*) in different regions of Brazil and other countries. Most of the information about clubroot comes from temperate regions, which are very different from the tropical and mountainous conditions where the present work was developed. Management strategies were assessed under these conditions aiming to increase broccoli yield and reduce losses caused by the disease. Two experiments were carried out in areas with a history of losses due to clubroot. The first experiment assessed the incorporation of four types of cover crops (green manure), coriander (*Coriandrum sativum*), sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.), sweet corn (*Zea mays* L.), and spontaneous vegetation, associated with the use of broccoli seedlings of different sizes. The second experiment assessed the use of soil correctives, limestone, and steel slag, associated with the application of poultry litter (fresh or composted for 45 days), and treatment without poultry litter. Both experiments tested disease intensity, plant development (root growth, biomass accumulation, and nutrient accumulation), and yield. Sunn hump and coriander biomass incorporation favored an increase in the healthy root system and biomass accumulation in broccoli plants. The use of large seedlings (35 cm³ cell and 28 days of age and 50 cm³ cell and 32 days of age) resulted in less-intensity clubroot, high plant development, and high yield of broccoli. Steel slag application provided soil acidity correction and plant growth equivalent to that obtained with limestone application, but it did not affect the disease intensity. Fresh or composted poultry litter application increased the intensity of clubroot but did not affect broccoli production. The results showed that, under favorable conditions to clubroot, poultry litter application should be reevaluated, and silicate-rich correctives showed no difference from limestone. On the other hand, simple measures such as the use of green manure (coriander or sunn hump) and, mainly, well-developed seedlings, reduce losses due to the disease.

Keywords: *Plasmodiophora brassicae*. *Brassica oleracea* var. *italica*. Green manure. Steel slag. Composting.

7. INTRODUÇÃO

A hérnia das crucíferas causada por *Plasmodiophora brassicae* Woronin, protozoário biotrófico e habitante do solo, é um dos principais fatores limitantes ao cultivo de brócolis (*Brassica oleracea* var. *italica*) e demais espécies de *Brassica* spp. no Brasil (HASSE et al., 2007; MELO, 2015; BHERING et al., 2017; SANTOS et al., 2017; BHERING et al., 2020; SANTOS et al., 2020a) e no mundo (DIXON, 2009a,b; DONALD & PORTER, 2009; BOTERO et al., 2019). O patógeno infecta as raízes de plantas hospedeiras causando galhas (hérnias) e reduzindo o sistema radicular ativo. Como consequência, a absorção de água e nutrientes é comprometida, o que pode levar ao subdesenvolvimento das plantas, redução da qualidade e da produção e, em casos mais severos, morte prematura das plantas (DIXON, 2009a,b; GOSSEN et al., 2014; MELO, 2015).

A germinação dos esporos de resistência, infecção e colonização das raízes de *Brassica* spp. por *P. brassicae* são favorecidas por condições de solos ácidos, ou parcialmente ácidos (pH<6,2), úmidos, e com temperaturas medianas, 20 a 25 °C (DIXON, 2009b; DONALD & PORTER, 2009; GOSSEN et al., 2014). O cultivo sequenciado e intensivo de espécies hospedeiras facilita a sobrevivência e a disseminação dos esporos de resistência do patógeno e o aumento do potencial de inóculo nas áreas e regiões especializadas no cultivo destas espécies (DIXON, 2009a,b). Os problemas causados pela doença têm se agravado exatamente por esta característica em diferentes regiões de produção de hortaliças no Brasil, sendo cultivadas por produtores familiares e especializados no cultivo de algumas poucas espécies, muitas delas pertencentes à família Brassicaceae (MELO, 2015; BHERING et al., 2017; MELO et al., 2019).

O manejo da doença é dificultado pela inexistência de cultivares resistentes de brócolis e controle químico limitado, sendo apenas um princípio ativo no Brasil, o ciazofamida (AGROFIT, 2020). No mundo, o controle químico da doença está relacionado a um pequeno número de ativos químicos (DONALD & PORTER, 2009). Uma vez introduzido na área, as estratégias de redução dos danos causados pelo patógeno se restringem ao manejo adequado do solo e das culturas (DONALD & PORTER, 2009; GOSSEN et al., 2014). Práticas como correção da acidez e elevação dos níveis de Ca²⁺ no solo pela calagem, restrição à movimentação de solo e rotação de culturas, são exemplos importantes no manejo da doença (DONALD & PORTER, 2009; GOSSEN et al., 2014; BHERING et al., 2017; SANTOS et al., 2020a).

A rotação de brássicas com algumas espécies não-hospedeiras de *P. brassicae* poderia estimular a germinação dos esporos de resistência do patógeno, sem que o mesmo complete o seu ciclo de vida, e levar à redução do potencial de inóculo e da intensidade da doença nos cultivos subsequentes (FRIBEG et al., 2006; HASSE et al., 2007; DONALD & PORTER, 2009; AHMED et al., 2011; HWANG et al., 2015). Dentre algumas espécies citadas como antagonista à *P. brassicae* estão o alho-poró (*Allium porrum*), centeio de inverno (*Secale cereale*), azevém-perene (*Lolium perenne*) (FRIBEG et al., 2006), menta (*Mentha piperita*); alfavaca (*Ocimum basilicum*); bardana (*Arctium minus*); cebolinha (*Allium fistulosum*); salsa (*Petroselinum hortense*) (HASSE et al., 2007), cevada (*Hordeum vulgare*), ervilha (*Pisum sativum*) e aveia (*Avena sativa*) (HWANG et al., 2015), citadas pela capacidade de estimular a germinação dos esporos de *P. brassicae* ou de reduzir a severidade da doença em cultivos subsequentes. O uso de pré-cultivos para adubação verde também é uma prática benéfica por promover a ciclagem de nutrientes e elevar o nível de matéria orgânica no solo (ARAÚJO et al., 2011; CORDEIRO et al., 2018; CASTRO & DEVIDE, 2018), sendo a escolha das espécies variável em função das condições e experiências locais e do objetivo da prática.

A elevação do pH do solo e o fornecimento de nutrientes como o cálcio e boro são medidas clássicas para o manejo da hérnia das crucíferas (NIWA et al., 2007; DIXON, 2009a,b; DONALD & PORTER, 2009; BHERING et al., 2017; SANTOS et al., 2017; SANTOS et al., 2020a). A aplicação de calcário é a prática mais utilizada e eficiente (SANTOS et al., 2017; SANTOS et al., 2020a). A sua utilização combinada ao uso do gesso agrícola também se mostrou satisfatória por melhorar as condições químicas do solo, reduzir a severidade da doença e aumentar o crescimento e produtividade em couve-flor (SANTOS et al., 2020a). O uso de silicatos de cálcio também é citado como eficiente corretor de acidez do solo, com a vantagem adicional do enriquecimento do solo com silício, relacionado à redução da ocorrência de patógenos como *Rhizoctonia solani* em arroz, *Colletotrichum lindemuthianum* em feijão, *Puccinia melanocephala* em cana de açúcar, *Phytophthora cinnamomi* em abacate, e *Ralstonia solanacearum* em tomate (POZZA et al., 2015). Dentre as fontes deste material está a escória de siderurgia, resíduo industrial da produção de aço que contém altos teores de silicato de cálcio e de magnésio. Apesar de ainda não ter sido testado em grande parte das culturas agrícolas, vem sendo usado em substituição ao calcário devido à sua grande disponibilidade e menor preço (PREZOTTI & MARTINS, 2012; OZA et al., 2018). Este resíduo apresenta sua ação como corretivo da acidez do solo (PREZOTTI & PARTINS, 2012) e a sua utilização está associada ao aumento da resistência das plantas a pragas e doenças (CAI et al., 2009, POZZA et al., 2015). No entanto, as informações sobre os efeitos desse resíduo sobre o crescimento de brássicas e redução de danos causados por doenças são escassas (MURAKAMI et al., 2004) ou incipientes.

Além da correção da acidez do solo, outra estratégia preconizada para o manejo da hérnia das crucíferas é a utilização de compostos orgânicos (TILSTON et al., 2002; NIWA et al., 2007; SANTOS et al., 2018a). No entanto, os resultados e efeitos da adição de compostos orgânicos são variáveis ou inconsistentes, provavelmente, devido às grandes variações na composição e doses dos compostos orgânicos utilizados, tipos de manejo e características do solo onde são aplicados. No Brasil, um dos adubos orgânicos mais utilizados na produção de várias hortaliças é a cama de aviário, muitas vezes sem prévia compostagem (ADAMI et al., 2012; BHERING et al., 2017; LIMA, 2019). Esta prática pode estar associada ao aumento da intensidade da hérnia das crucíferas em couve-flor nos solos ácidos da Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro (BHERING et al., 2017; 2020). A comprovação e compreensão destes possíveis efeitos sobre a hérnia das crucíferas e produção de brócolis necessitam ser averiguados visando nortear as prescrições no uso deste tipo de resíduo orgânico.

O presente trabalho foi conduzido na Região Serrana do Rio de Janeiro (Brasil), uma das principais áreas de produção de *Brassica* spp. do país, e com características típicas de agricultura de montanha em condições tropicais (BHERING et al., 2017; 2020; SANTOS et al., 2017, 2020a). Nesta, o cultivo de brócolis e de outras brássicas é feito de forma intensificada, em áreas de pequenos agricultores, com solos ácidos, declivosos, com baixa ou nenhuma adesão às práticas de rotação de culturas com espécies não-hospedeiras, com uso massivo de cama de aviário e agroquímicos, negligências com a correção da acidez do solo e a produção de mudas. A este cenário são inseridos relatos recorrentes de redução da produtividade e aumento de perdas pela hérnia das crucíferas.

Outros desafios nesta região se referem à qualidade das mudas produzidas e o cultivo de brócolis na primavera/verão. Em função da opção atual da maioria dos produtores por adquirir as mudas prontas, produzidas por viveiristas especializados, tem sido uma prática recorrente a utilização de mudas de menor tamanho, produzidas em bandejas com maior número de células com economia de substrato, espaço e tempo de formação das mudas. A utilização de mudas menores, porém, implica em elevado estresse pós-transplântio, inferior taxa de pegamento e extensão do ciclo da cultura e assim de sua exposição aos problemas fitossanitários. Este problema se agrava no período de primavera-verão, pelas condições mais

adversas à cultura, mas de melhor rentabilidade ou melhores preços por ser a época de entressafra. Estas adversidades decorrem das elevadas temperaturas e precipitações (INMET, 2018), que são desfavoráveis à cultura (MELO, 2015) e mais favoráveis à hérnia das crucíferas (DIXON, 2009a,b).

Tendo em vista os desafios apontados para a produção de brócolis, controle de hérnia das crucíferas, e a necessidade de se buscar alternativas de manejo, desenvolveu-se o presente trabalho embasado na premissa de que a produção de brócolis em áreas contaminadas com *P. brassicae* em períodos favoráveis à doença pode ser otimizada com práticas que favoreçam a melhoria da fertilidade do solo e o desenvolvimento das plantas. Desta forma, delinearam-se dois experimentos de campo a fim de testar quatro estratégias de manejo e os seus efeitos sobre a fertilidade de solo, desenvolvimento do brócolis e da hérnia das crucíferas: a) utilização de pré-cultivos para adubação verde com incorporação da biomassa ao solo; b) aumento do tamanho das mudas; c) aplicação de corretivo rico em silicato de cálcio em contraste ao uso de calcário; d) aplicação da cama de aviário fresca e compostada.

8. MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo, elegeu-se o brócolis americano como cultura de trabalho em função do seu menor ciclo de cultivo, comparado ao da couve-comum, e por ser uma brássica igualmente importante no contexto produtivo da região estudada. Relatos de perdas de produtividade pela ocorrência da hérnia das crucíferas nas lavouras de brócolis são reportados pelos produtores com base em levantamentos prévios *in loco*.

Realizaram-se dois ensaios de campo no município de Petrópolis, RJ, Brasil, (22°25'41.64"S 43°02'54.49"O, 1274m) e (22°25'36.48"S 43°02'54.22"O, 1261 m) em áreas com histórico de ocorrência de hérnia das crucíferas e cultivo intensivo de brássicas. Testes preliminares utilizando-se amostras de solos provenientes das duas áreas resultaram em incidência da doença em plantas de rúcula (*Eruca sativa* Miller) variando de 73% a 86%.

O primeiro ensaio foi realizado de novembro de 2017 a maio de 2018, em área de depressão na paisagem e mais propensa ao acúmulo de água e esporos de *P. brassicae* oriundos das lavouras localizadas nas áreas superiores. Esta área foi previamente cultivada com couve-flor (*B. oleracea* var. *botrytis* L.) e apresentava as seguintes condições iniciais de fertilidade do solo (0-20 cm): $\text{pH}_{(\text{água})} = 5,95$; $\text{Al}^{3+} = 0,02 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Ca}^{2+} = 5,13 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Mg}^{2+} = 2,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{CTC} = 11,27 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; acidez potencial (H+ Al) = $3,75 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{V}(\%) = 67,0\%$; e P assimilável = $34,15 \text{ mg kg}^{-1}$ e $\text{K}^+ = 107,11 \text{ mg kg}^{-1}$.

O segundo ensaio foi realizado de dezembro de 2017 a junho de 2018, em área previamente cultivada com salsa [*Petroselinum crispum* (Mill.) Nym.] e rabanete (*Raphanus sativus* L.) e com as seguintes características de fertilidade do solo (0-20 cm): $\text{pH}_{(\text{água})} = 5,80$; $\text{Al}^{3+} = 0,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Ca}^{2+} = 4,20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Mg}^{2+} = 1,40 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{CTC} = 14,32 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; H + Al = $8,66 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{V}(\%) = 39,5\%$; P = $20,10 \text{ mg kg}^{-1}$ e $\text{K}^+ = 216,9 \text{ mg kg}^{-1}$. Registros meteorológicos dos respectivos períodos de cultivos foram obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2018).

8.1 Adubação verde e tamanho de mudas

Avaliaram-se os efeitos da adubação verde com a incorporação da biomassa de três espécies vegetais (pré-cultivo seguido de incorporação da biomassa), e do tamanho de mudas de brócolis sobre a intensidade da hérnia das crucíferas e o desenvolvimento de brócolis. Como espécies para adubação verde, avaliaram-se o coentro (*Coriandrum sativum* L.), crotalária (*Crotalaria juncea* L.), milho-doce (*Zea mays* L.) e a vegetação espontânea como testemunha. Cada espécie foi semeada em canteiros com 1,0 m de largura e linhas espaçadas em 0,30 m, perpendiculares aos canteiros, em densidade de plantas igual a 45, 20 e 10 indivíduos linha⁻¹, respectivamente (Figura 7a). A população de plantas foi estimada em 1.500.000; 666.67; e 333.33 indivíduos ha⁻¹ para coentro, crotalária e milho, respectivamente. Na testemunha, mantiveram-se os canteiros isentos de cultivo e sem capinas permitindo o livre desenvolvimento da vegetação espontânea. As espécies de plantas espontâneas predominantes nestas parcelas foram identificadas como: *Amaranthus retroflexus* L., *Bidens pilosa* L., *Brachiaria decumbens* Stapf, *Eleusine indica* (L.) Gaertn, *Galinsoga ciliata* (Raf.) Blake, *Melampodium perfoliatum* (Cav.) Kunth., *Panicum maximum* Jacq., *Polygonum persicaria* L., *Portulaca oleracea* L., *Sonchus oleraceus* L., e *Spergula arvensis* L. (LORENZI, 2014).

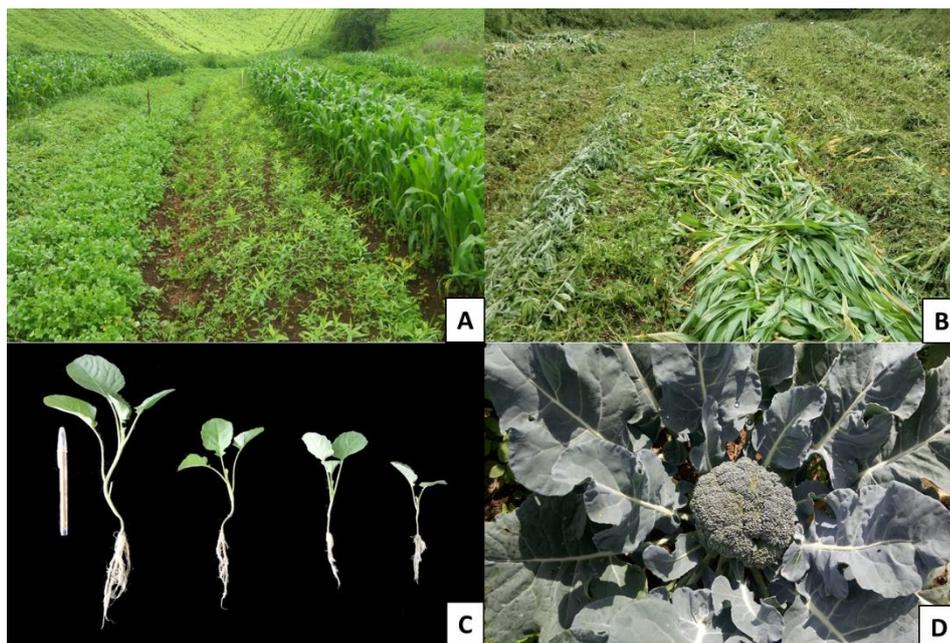


Figura 7. Pré-cultivo (A) e incorporação (B) de coentro, crotalária, milho e vegetação espontânea, utilizados como cultivos antecessores; quatro tamanhos de mudas de brócolis americano cv. Avenger (C) (da direita para a esquerda: Tamanho 1 - célula de 10 cm³ e idade de 20 dias; Tamanho 2 - célula de 16 cm³ e idade de 24 dias; Tamanho 3 - célula de 35 cm³ e idade de 28 dias; Tamanho 4 - célula de 50 cm³ e idade de 32 dias); avaliação e colheita das inflorescências (D) em ensaio realizado em condições de campo no período de novembro de 2017 a maio de 2018 em Petrópolis, RJ. Seropédica, UFRRJ, 2020.

A produção de biomassa fresca e seca dos pré-cultivos (adubos verdes) foi avaliada aos 75 dias após a semeadura (DAS). Efetuaram-se amostragens aleatórias com quadrado de 0,25 m² e posterior secagem em estufa até peso constante. Em seguida, as plantas foram roçadas na base do caule (Figura 7b) e mantidas sobre o solo até os 82 DAS, quando foram incorporadas com auxílio de enxada rotativa.

As amostras secas foram moídas e digeridas conforme método 3050 (USEPA, 2008) visando a determinação dos teores de macronutrientes. Os teores de K foram determinados por espectrometria de emissão de chama e os de P por colorimetria de metavanadato (MALAVOLTA et al., 1997). Os elementos Ca e Mg foram determinados em espectrofotômetro de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

Os teores totais de N, S e C foram obtidos a partir de análise via combustão seca em medidor Elemental CHNO-S Vario Macro Cube e, posteriormente, determinada a relação carbono/nitrogênio (relação C/N). Tendo como base os teores de macronutrientes encontrados e a massa seca produzida, foram calculados os valores acumulados nos pré-cultivos e a estimativa de aporte de nutrientes.

Testaram-se, ainda, quatro tamanhos de mudas de brócolis americano, cultivar Avenger^H (Sakata) (Figura 7c). As mudas foram obtidas por meio do semeio em bandejas com diferentes volumes de células, (10, 16, 35 e 50 cm³), associado ao escalonamento da época de semeadura e, conseqüentemente, da idade das mudas, 20, 24, 28, 32 dias após o semeio. Previamente ao transplantio, coletaram-se amostras de mudas que foram caracterizadas quanto ao número de folhas expandidas, altura, área foliar, massa fresca e seca da parte aérea e raiz, além de comprimento e volume de raiz. Os dados foram submetidos à estatística descritiva utilizando o programa Microsoft Office Excel[®] (Tabela 2).

Tabela 2. Médias e desvios referentes às variáveis número de folhas (unidades), altura (cm), área foliar (cm²), massa fresca e seca da parte aérea (cm); e volume (cm³), comprimento (cm), massa fresca e seca (g) de raiz de quatro diferentes tamanhos de mudas (Tamanho 1 = célula de 10 cm³ e idade de 20 dias; Tamanho 2 = célula de 16 cm³ e idade de 24 dias; Tamanho 3 = célula de 35 cm³ e idade de 28 dias; Tamanho 4 = célula de 50 cm³ e idade de 32 dias). Seropédica, UFRRJ, 2020.

	Parte aérea					Raiz			
	Nº de folhas	Altura (cm)	Área foliar (cm ²)	Massa fresca (g)	Massa seca (g)	Volume (cm ³)	Comprimento (cm)	Massa fresca (g)	Massa seca (g)
Tamanho 1 - célula de 10 cm³ e idade de 20 dias									
Médias	1,83 ± 0,4	4,38 ± 0,51	13,69 ± 3,00	0,54 ± 0,11	0,071 ± 0,014	0,28 ± 0,07	6,87 ± 0,84	0,314 ± 0,10	0,018 ± 0,005
Tamanho 2 - célula de 16 cm³ e idade de 24 dias									
Médias	2,30 ± 0,5	6,17 ± 0,88	28,28 ± 5,61	1,33 ± 0,13	0,135 ± 0,027	0,31 ± 0,11	8,25 ± 1,17	0,388 ± 0,10	0,0215 ± 0,007
Tamanho 3 - célula de 35 cm³ e idade de 28 dias									
Médias	3,00 ± 0,5	7,78 ± 0,91	53,54 ± 14,37	2,50 ± 0,69	0,260 ± 0,114	0,61 ± 0,16	11,11 ± 2,71	0,56 ± 0,21	0,036 ± 0,010
Tamanho 4 - célula de 50 cm³ e idade de 32 dias									
Médias	4,00 ± 0,5	11,43 ± 1,50	71,69 ± 28,33	3,87 ± 1,39	0,336 ± 0,158	0,98 ± 0,47	14,96 ± 3,27	1,37 ± 0,81	0,067 ± 0,028

O delineamento utilizado foi de blocos casualizados com cinco repetições em esquema de parcela subdivididas, sendo as áreas pré-cultivadas as parcelas e os quatro tamanhos de mudas as subparcelas. Cada subparcela continha 6 plantas úteis e 4 plantas como bordadura nas extremidades (Figura 8).

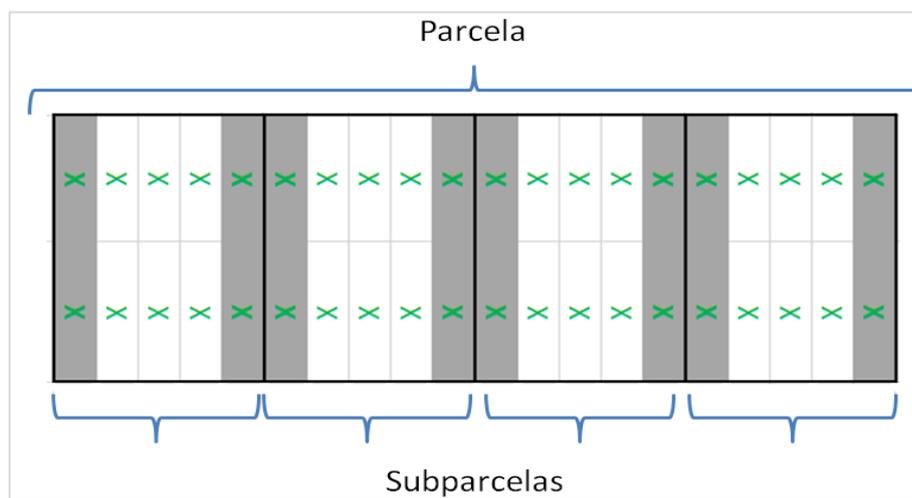


Figura 8. Exemplo de parcela experimental contendo subparcelas, parcela útil (em branco) e bordaduras das subparcelas (em cinza). Seropédica, UFRRJ, 2020.

O transplântio das mudas de brócolis para o campo foi realizado em 16 de fevereiro de 2018, doze dias após a incorporação da biomassa das plantas. Nesta data, coletaram-se amostras de solo por parcela na profundidade de 0-20 cm para determinação dos teores totais de C, N, S e da relação C/N do solo. Esta determinação foi feita por análise via combustão seca em medidor Elementar CHNO-S. Analisaram-se ainda os atributos químicos de fertilidade do solo (DONAGEMMA et al., 2011) obtendo-se o pH_(água), teores de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, P assimilável, capacidade de troca catiônica (CTC), acidez potencial (H+Al) e saturação

por bases (V%). Em seguida, incorporaram-se diretamente nas covas de plantio cama de aviário fresca (não compostada) ($11,11 \text{ Mg ha}^{-1}$), além de $25,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de N (na forma de ureia), 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 (na forma de superfosfato simples) e 48 kg ha^{-1} de K_2O (cloreto de potássio). Após a incorporação dos adubos, transplantaram-se as mudas observando-se o espaçamento de $0,60 \text{ m}$ (linhas) x $0,60 \text{ m}$ (plantas).

As plantas foram irrigadas por aspersão em turnos de rega de três dias. Foram realizadas adubações de cobertura aos 20, 40 e 60 dias após o transplântio (DAT), com aplicação de $25,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de N (ureia) e 48 kg ha^{-1} de K_2O (cloreto de potássio). Simultaneamente, aplicaram-se via foliar ácido bórico ($1,0 \text{ g L}^{-1}$) e molibdato de sódio ($0,5 \text{ g L}^{-1}$). Para o controle de plantas daninhas procedeu-se a capina manual aos 40 DAT.

As colheitas foram realizadas aos 86 e 96 DAT, quando a maioria das plantas apresentavam inflorescências em ponto de colheita comercial, isto é, com boa uniformidade, compactas e com os grânulos bem fechados (MELO, 2015) (Figura 7d). Nestas datas, coletaram-se as plantas efetuando-se um corte rente na base do caule. Em seguida, as raízes foram retiradas com auxílio de pá reta, visando manter a sua máxima integridade, e lavadas em água corrente. Nas raízes foi quantificada a severidade da doença (SANTOS et al., 2017), o volume e a massa fresca da fração sadia e com galhas (BHERING et al., 2017) e a porcentagem de raízes com galhas, expressa em massa fresca e volume (SANTOS et al., 2020a).

Na parte aérea, determinaram-se a massa fresca das folhas, caule e inflorescência e o diâmetro longitudinal das inflorescências. Com os dados das massas frescas das inflorescências foi estimada a produtividade total (Mg ha^{-1}). A massa seca dos respectivos órgãos foi determinada após secagem em estufa de circulação de ar com temperatura ajustada para 65°C até peso constante. Os valores obtidos foram somados visando à obtenção da massa seca da planta.

Quantificaram-se os teores de macronutrientes de cada órgão da planta em amostras secas e digeridas (USEPA, 2008) seguindo a mesma metodologia (MALAVOLTA et al., 1997) e equipamentos anteriormente mencionados na caracterização das plantas para a adubação verde. De posse dos teores, foram calculados os valores acumulados nos diferentes órgãos e na planta inteira.

8.2 Correção de acidez e adubação com cama de aviário

Comparou-se a eficiência da escória de siderurgia, em relação ao calcário na correção da acidez do solo, e o efeito da adubação de plantio com cama de aviário fresca (não compostada) e compostada por 45 dias quanto à intensidade da hérnia das crucíferas e o desenvolvimento de plantas de brócolis. A escória de siderurgia, composta por silicato de cálcio e magnésio (Agrosilício Plus[®]), continha 25,0% de Ca, 6,0% de Mg e 10,5% de Si. O calcário agrícola dolomítico (Mibita[®]) continha 39% de CaO, 11,0% de MgO e poder relativo de neutralização total (PRNT) igual a 91,26%. As doses dos corretivos foram determinadas através de uma curva de incubação de amostras de solo da área com os respectivos corretivos (SANTOS et al., 2017) visando atingir pH igual a 6,5, ideal para a cultura do brócolis (MELO, 2015). Este valor de pH foi alcançado com as doses de $3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ da escória e de $3,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ do calcário. A aplicação dos corretivos foi realizada à lanço (Figura 9a), seguida de incorporação com enxada rotativa em 20 de dezembro de 2017.

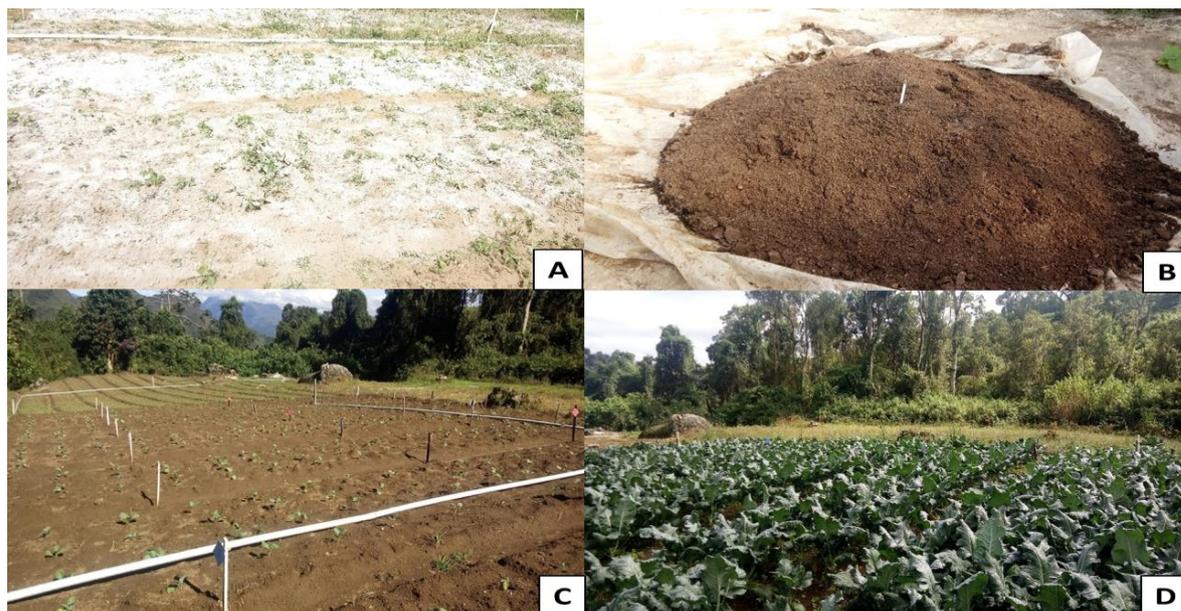


Figura 9. Aplicação de corretivos (A); compostagem de cama de aviário por 45 dias (B); transplântio das mudas de brócolis cv. Avenger (C); e condução do cultivo a campo (D) em Petrópolis, RJ, de março a junho de 2018. Seropédica, UFRRJ, 2020.

A cama de aviário foi obtida em granja de produção de frango. A amostra fresca (não compostada) apresentava as seguintes características: umidade = 21,2%; pH = 7,92; CE = 2,13 dS m⁻¹; relação C/N = 16,88; C = 320,63 g kg⁻¹; N = 19,00 g kg⁻¹; Ca = 41,23 g kg⁻¹; Mg = 3,16 g kg⁻¹; P = 5,72 g kg⁻¹; K = 17,75 g kg⁻¹; e S = 2,31 g kg⁻¹. A cama compostada por 45 dias (Figura 9b) apresentava as seguintes características: umidade = 37,3%; pH = 7,70; CE = 3,21 dS m⁻¹; relação C/N = 17,75; C = 286,07 g kg⁻¹; N = 16,13 g kg⁻¹; Ca = 61,57 g kg⁻¹; Mg = 7,15 g kg⁻¹; P = 9,07 g kg⁻¹; K = 26,81 g kg⁻¹; e S = 4,51 g kg⁻¹. A cama de aviário fresca e a cama de aviário compostada por 45 dias foram aplicadas e incorporadas nas covas no dia anterior ao transplântio, em dose equivalente a 400 g planta⁻¹ (11,11 Mg ha⁻¹), expresso em base seca.

O transplântio das mudas de brócolis foi realizado em 17 de março de 2018, aos 87 dias após a aplicação dos corretivos (Figura 9c). Utilizaram-se mudas de brócolis americano, cultivar Avenger^H (Sakata) com 28 dias de idade e produzidas em bandejas de 128 células com 35 cm³ cada. Observou-se o espaçamento de 0,60 m entre linhas e 0,60 metros entre as plantas.

O delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições em esquema de parcelas subdivididas: duas parcelas caracterizadas pelos dois corretivos; três subparcelas caracterizadas pela cama de aviário fresca (não compostada), cama de aviário compostada (45 dias) e o controle (sem cama de aviário). Cada subparcela continha 24 plantas.

Assim como no ensaio anterior, coletaram-se amostras de solo por subparcela para posterior análise química de fertilidade na ocasião dos transplântio das mudas, isto é, 87 dias após a aplicação dos corretivos. As adubações minerais de plantio e de cobertura foram realizadas de forma similar ao primeiro ensaio. A irrigação e os tratos culturais também foram realizados seguindo a mesma metodologia usada no primeiro ensaio (Figura 9d). As colheitas e avaliações das plantas foram feitas aos 74, 79 e 86 DAT, obtendo-se as mesmas variáveis mensuradas no ensaio anterior.

Os dados obtidos em ambos os ensaios foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey (p<0,05) utilizando-se o *software* estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

9. RESULTADOS

9.1 Adubação verde e tamanho de mudas

O milho produziu maior quantidade de biomassa fresca (124,33 Mg ha⁻¹) e seca (14,50 Mg ha⁻¹), médias estas superiores ($p \leq 0,05$) às das demais espécies, que foram similares entre si (Tabela 3). A massa seca do milho, comparada a das demais espécies, apresentava maior relação C/N (36,48), baixos teores de N (11,08 g kg⁻¹), Mg (2,62 g kg⁻¹) e S (1,10 g kg⁻¹), altos valores de P (5,79 g kg⁻¹), e quantidade intermediária de Ca (37,46 g kg⁻¹), e K (45,48 g kg⁻¹). As massas secas de crotalária e do coentro continham teores mais elevados de N (22,93 g kg⁻¹ e 19,90 g kg⁻¹, respectivamente), e menores relações C/N (18,08 e 16,20, respectivamente). Em função da maior biomassa produzida, o pré-cultivo de milho resultou em maior ($p \leq 0,05$) extração e incorporação no solo de N, Ca, Mg, P, K e S (Tabela 3).

Tabela 3. Caracterização dos pré-cultivos (milho, coentro, crotalária e vegetação espontânea) e estimativa da quantidade de biomassa fresca e seca (Mg ha⁻¹) e de nutrientes incorporados ao solo 12 dias antes do transplântio das mudas de brócolis.

Caracterização dos pré-cultivos								
Pré-cultivos	Relação C/N	C	N	Ca	Mg	P	K	S
		g kg ⁻¹						
Milho	36,48 a	404,27 a	11,08 b	37,46 bc	2,62 c	5,79 a	45,48 b	1,10 b
Coentro	16,20 b	322,47 a	19,90 a	45,43 ab	5,70 ab	6,54 a	90,40 a	2,40 a
Crotalária	18,08 b	414,70 a	22,93 a	31,59 c	5,52 b	3,17 b	26,40 c	2,11 a
Espontâneas	20,66 b	366,85 a	17,75 ab	47,24 a	6,59 a	4,70 ab	59,86 b	2,71 a
CV%	19,70	14,03	20,93	9,61	8,79	23,78	14,95	18,68
Estimativa da quantidade incorporada ao solo								
Pré-cultivos	Biomassa fresca	Biomassa seca	N	Ca	Mg	P	K	S
	Mg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹					
Milho	124,33 a	14,50 a	160,58 a	543,16 a	38,01 a	83,93 a	659,45 a	15,91 a
Coentro	28,50 b	2,10 b	41,79 b	95,40 b	11,98 c	13,72 b	189,85 b	5,04 c
Crotalária	18,70 b	3,55 b	81,38 b	112,14 b	19,58 b	10,06 b	93,71 c	7,48 bc
Espontâneas	29,76 b	3,13 b	55,56 b	147,64 b	20,60 b	14,70 b	187,07 b	8,49 b
CV%	15,29	15,57	23,31	14,51	7,64	16,99	13,65	13,88

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Na data do transplântio das mudas de brócolis, doze dias após a roçagem e incorporação das plantas para adubação verde, os solos pré-cultivados com os quatro tratamentos diferiram significativamente ($p \leq 0,05$) quanto aos diferentes atributos relacionados à fertilidade e quanto aos valores totais de N e S (Tabela 4).

Os maiores valores de pH foram registrados nos solos com vegetação espontânea (pH = 5,84) e coentro (pH = 5,80). Os menores valores, por sua vez, foram registrados nas áreas com milho (pH = 5,61). As áreas pré-cultivadas com crotalária apresentaram maiores teores de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, e maior capacidade de troca catiônica (CTC). Não houve efeito significativo dos tratamentos com as diferentes plantas usadas para adubação verde sobre a acidez potencial (H + Al), saturação por bases (V%), e teores de C e P assimilável (Tabela 4). Os maiores teores totais de N no solo foram observados nas áreas com crotalária, 4,60 g kg⁻¹; seguido das áreas com coentro e com vegetação espontânea. Menores teores totais de N no

solo foram registrados nas parcelas com pré-cultivo do milho. As áreas com incorporação do coentro e da crotalária apresentaram os maiores valores de S, e aquelas com incorporação do milho apresentaram os menores de S (Tabela 4).

Tabela 4. Atributos químicos do solo na ocasião do transplântio das mudas de brócolis, 12 dias após a roçagem e incorporação dos resíduos das plantas antecessoras (milho, coentro, crotalária e vegetação espontânea).

Pré-cultivos	pH	C	N	S	Relação C/N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+AL	CTC	V	K ⁺	P
	(água)	g kg ⁻¹				----- cmol _c dm ³ -----	%		----- mg dm ³ -----			
Milho	5,61 c	39,34 a	3,86 b	4,34 d	10,34 a	6,58 c	2,38 c	2,60 a	11,62 c	77,64 a	95,61 ab	22,56 a
Coentro	5,80 ab	40,98 a	4,30 ab	8,00 a	9,51 a	7,10 bc	2,88 c	2,94 a	12,99 c	77,54 a	101,78 ab	26,30 a
Crotalária	5,73 b	44,18 a	4,60 a	6,61 b	9,58 a	9,20 a	4,86 a	3,58 a	17,72 a	79,66 a	118,68 a	28,46 a
Espontâneas	5,84 a	40,58 a	4,10 ab	5,70 c	9,87 a	8,04 b	3,58 b	3,62 a	15,31 b	76,61 a	92,13 b	24,92 a
CV(%)	1,06	9,58	6,65	4,53	6,52	7,93	9,25	21,03	6,16	4,74	13,66	17,59

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (p ≤ 0,05). Al = 0,00 cmol_c dm³

Durante o ciclo do brócolis, foram observadas temperaturas altas, e frequentes precipitações, especialmente, no início do ciclo. As temperaturas variaram de 12,2 a 24,2° C, e com média de 14,7 °C (Figura 10). A precipitação acumulada durante o ciclo da cultura foi muito elevada, 624 mm, sendo 384 mm concentrados nos 30 primeiros dias (Figura 10). Estas condições, especialmente a elevada precipitação no início do ciclo favoreceram o desenvolvimento precoce da hérnia das crucíferas – diagnosticada aos 26 dias após o transplântio das mudas.

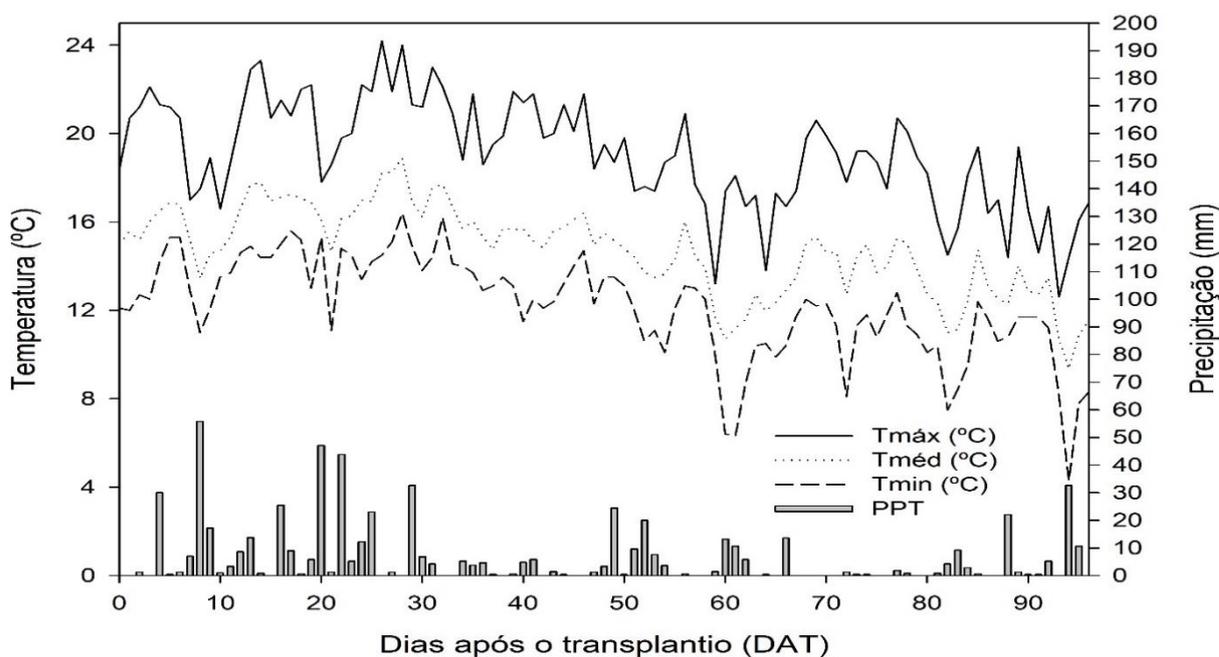


Figura 10. Registros diários de temperatura e umidade relativa (máximas, médias e mínimas) e precipitação durante o ciclo do brócolis no período compreendido entre fevereiro e maio de 2018 em Petrópolis-RJ. Fonte: INMET (2018).

Não houve efeito significativo da interação planta de adubação verde x tamanho de mudas sobre nenhuma das variáveis avaliadas. Observou-se somente efeito simples dos dois fatores que foram, portanto, analisados separadamente (Tabela 5).

Os tratamentos envolvendo os pré-cultivos não influenciaram ($p \leq 0,05$) na severidade da doença, na porcentagem das hérnias nas raízes (PMFRH) e nem na produção de massa seca total das raízes. A adubação verde com crotalária e coentro, assim como a vegetação espontânea, resultaram em plantas de brócolis com maior produção de biomassa seca, comparado à adubação verde com o milho. Os maiores volumes de raízes foram observados nas plantas de brócolis cultivadas nas parcelas com incorporação da leguminosa crotalária (Tabela 5). Os tratamentos com adubação verde, no entanto, não influenciaram significativamente o acúmulo de massa fresca nem o diâmetro das inflorescências de brócolis ou a produtividade (Tabela 5).

Tabela 5. Efeito de pré-cultivos e incorporação da biomassa fresca de milho, coentro, crotalária e vegetação espontânea, e do tamanho de mudas de brócolis (Tamanho 1 = célula de 10 cm³ e idade de 20 dias; Tamanho 2 = célula de 16 cm³ e idade de 24 dias; Tamanho 3 = célula de 35 cm³ e idade de 28 dias; Tamanho 4 = célula de 50 cm³ e idade de 32 dias) sobre a severidade da hérnia das crucíferas (causada por *Plasmodiophora brassicae*), porcentagem de hérnias nas raízes (PMFRH), volume de raiz sadia (mL), massa seca total das raízes e da planta (g), massa fresca (g) e diâmetro (cm) das inflorescências e produtividade estimada (Mg ha⁻¹).

Pré-cultivos / Tamanho de mudas	Pré-cultivos							
	Hérnia e crescimento radicular				Crescimento da planta e produção			
	Severidade (%)	PMFRH (%)	Volume de raiz sadia (mL)	Massa seca de raiz (g)	Massa seca da planta (g)	Inflorescência		Produtividade (Mg ha ⁻¹)
						Massa Fresca (g)	Diâmetro (cm)	
Milho	42,62 a	43,81 a	24,30 b	9,60 a	44,67 b	73,96 a	7,86 a	2,11 a
Coentro	42,47 a	41,57 a	31,26 ab	10,41 a	60,77 a	118,71 a	6,55 a	3,23 a
Crotalária	40,04 a	40,28 a	43,67 a	11,94 a	61,24 a	123,25 a	12,56 a	3,30 a
Espontâneas	42,93 a	41,92 a	30,99 ab	10,67 a	60,14 ab	111,14 a	6,50 a	3,08 a
CV1(%)	11,52	8,78	22,45	22,55	15,29	33,46	33,56	25,15
	Tamanho de mudas							
Tamanho 1	49,92 a	47,83 a	26,65 b	7,08 b	40,08 b	57,31 b	4,71 c	1,59 b
Tamanho 2	47,57 a	45,46 ab	30,74 ab	9,89 ab	50,23 b	70,37 b	5,96 bc	1,83 b
Tamanho 3	35,78 b	38,21 bc	35,53 a	12,57 a	67,58 a	139,52 a	9,09 ab	3,85 a
Tamanho 4	34,78 b	36,08 c	37,92 a	13,09 a	68,92 a	159,86 a	13,71 a	4,45 a
CV2(%)	13,49	12,78	17,37	20,00	17,18	33,24	30,63	24,16

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Os dados representam médias de 24 plantas.

Nas plantas de brócolis cultivadas nas parcelas com cultivo e incorporação da biomassa do milho houve menor crescimento comparado àquelas cultivadas no tratamento com crotalária e coentro (Tabela 5). Esta diferença, porém, não afetou a produtividade de brócolis, resultou apenas em redução desta produtividade, sem diferir estatisticamente ($p \leq 0,05$) (Tabela 5). Ainda, nas plantas de brócolis cultivadas nas parcelas com cultivo e incorporação de biomassa de milho, verificaram-se menores teores e acúmulo de N e de S e maior relação C/N (10,96), quando comparadas àquelas cultivadas em sucessão à crotalária (9,76) e ao coentro (9,26) (Tabela 6).

Tabela 6. Efeito de pré-cultivos e incorporação de biomassa fresca de plantas de milho, coentro, crotalária e vegetação espontânea, e do tamanho de mudas de brócolis (Tamanho 1 = célula de 10 cm³ e idade de 20 dias; Tamanho 2 = célula de 16 cm³ e idade de 24 dias; Tamanho 3 = célula de 35 cm³ e idade de 28 dias; Tamanho 4 = célula de 50 cm³ e idade de 32 dias) sobre a relação carbono / nitrogênio (C/N), teores médios de N e S, e acúmulo de N, S, Ca, Mg, P e K em plantas de brócolis.

Pré-cultivos / Tamanho de mudas	Relação C/N	N		S		Ca	Mg	P	K
		-----g kg ⁻¹ -----		-----g planta ⁻¹ -----					
Milho	10,96 a	29,20 c	5,57 c	1,29 b	0,249 b	3,16 b	0,35 b	0,52 a	4,27 a
Coentro	9,26 b	36,15 a	7,25 ab	2,20 a	0,435 a	5,74 a	0,53 a	0,69 a	5,70 a
Crotalária	9,76 b	33,12 ab	6,94 b	2,04 a	0,417 a	4,26 ab	0,43 ab	0,64 a	5,43 a
Espontâneas	10,02 ab	32,98 b	8,28 a	2,00 a	0,493 a	3,69 b	0,44 ab	0,68 a	5,78 a
CV1(%)	10,60	10,07	19,12	32,42	29,17	38,56	39,37	33,89	35,36
Tamanho 1	10,14 a	32,64 a	6,90 ab	1,31 b	0,276 a	3,27 b	0,33 b	0,49 b	4,20 b
Tamanho 2	9,53 a	33,26 a	7,57 a	1,68 ab	0,384 ab	4,00 ab	0,41 ab	0,61 ab	5,04 ab
Tamanho 3	10,13 a	31,47 a	6,80 ab	2,26 a	0,479 a	5,15 a	0,53 a	0,76 a	6,37 a
Tamanho 4	10,20 a	32,63 a	6,53 b	2,29 a	0,455 a	4,43 ab	0,47 ab	0,66 ab	5,55 ab
CV2(%)	10,28	13,73	16,46	41,38	40,19	37,44	37,15	41,40	39,53

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Os dados representam médias de 24 plantas.

Superior acúmulo de biomassa, maiores teores de N e menor relação C/N foram observados nas plantas de brócolis provenientes de áreas pré-cultivadas e com incorporação de coentro e crotalária. Maiores teores de S, por sua vez, foram identificados em plantas de brócolis cultivadas nos tratamentos com vegetação espontânea e pré-cultivo de coentro (Tabela 6). Maiores acúmulos de Ca foram observados nas plantas de brócolis oriundas de áreas com pré-cultivo de coentro e de crotalária (5,74 e 4,26 g planta⁻¹, respectivamente). No tocante ao nutriente Mg, o maior acúmulo se deu nas plantas oriundas das parcelas com pré-cultivo de coentro, crotalária, e vegetação espontânea, e menores teores de Ca e Mg no brócolis oriundo das parcelas com pré-cultivo de milho. Não foram observadas diferenças significativas quanto ao acúmulo de P e K nas plantas de brócolis oriundas dos quatro tratamentos com pré-cultivos.

O tamanho das mudas, por sua vez, afetou significativamente ($p < 0,05$) todas as variáveis relacionadas à intensidade da doença, desenvolvimento das plantas e produtividade (Tabela 5). Menor intensidade da doença, severidade e porcentagem da massa fresca de galhas, e maior volume de raízes sadias e massa seca de raiz, foram registrados nas plantas obtidas de mudas maiores, tamanho 3 (célula de 35 cm³ e idade de 28 dias) e 4 (célula de 50 cm³ e idade de 32 dias) (Tabela 5). Consequentemente, as plantas oriundas das mudas de tamanho 3 e 4 apresentaram melhor desenvolvimento, expresso pela maior massa seca da planta, massa fresca e diâmetro das inflorescências e produtividade (Tabela 5). O tamanho das mudas, no entanto, não influenciou o teor de N das plantas de brócolis (32,64 a 33,26 g kg⁻¹) nem a relação C/N (9,53 a 10,20). Este fator influenciou apenas o teor de S, que foi superior nas plantas provenientes de mudas de Tamanho 2 (7,57 g kg⁻¹). Inferior acúmulo de N, Ca, Mg, P e K se deu nas plantas provenientes das mudas menores (Tamanho 1 = célula de 10 cm³ e idade de 20 dias), e os maiores acúmulos nas plantas provenientes das mudas maiores, Tamanhos 3 e 4, seguido de Tamanho 2. Para S, os valores acumulados variaram pouco em função do tamanho de muda utilizado (Tabela 6).

9.2 Correção de acidez e adubação com cama de aviário

Os dois corretivos utilizados, escória de siderurgia e calcário, não diferiram significativamente ($p \leq 0,05$) quanto aos efeitos sobre os atributos químicos de solo, avaliados

aos 87 dias após a aplicação, exceto sobre o pH. Ambos os corretivos proporcionaram elevação do pH inicial, que era 5,80. A aplicação de calcário, no entanto, resultou em pH significativamente superior ao obtido com a aplicação de escória, sendo 6,23 e 6,00, respectivamente. Os teores de Ca^{2+} variaram de 7,94 a 8,12 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; os de Mg^{2+} de 4,09 a 4,10 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; os de K^+ de 185,44 a 205,42 mg kg^{-1} e os de P assimilável, de 18,56 a 20,33 mg kg^{-1} . A CTC variou de 17,66 a 17,93 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; o teor de Al foi igual 0,00 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ em ambos os tratamentos; a acidez potencial (H + Al) variou de 5,56 a 5,66 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; e a saturação por bases V(%) variou de 68,50 a 68,84%. Ou seja, as condições de fertilidade do solo resultantes da utilização de ambos os corretivos estiveram de acordo com a faixa recomendada para o cultivo de brócolis (MELO, 2015).

Durante o ciclo da cultura foram registradas temperaturas medianas, de 13,4 °C a 23°C, e precipitações leves e bem distribuídas que totalizaram 277 mm (Figura 11).

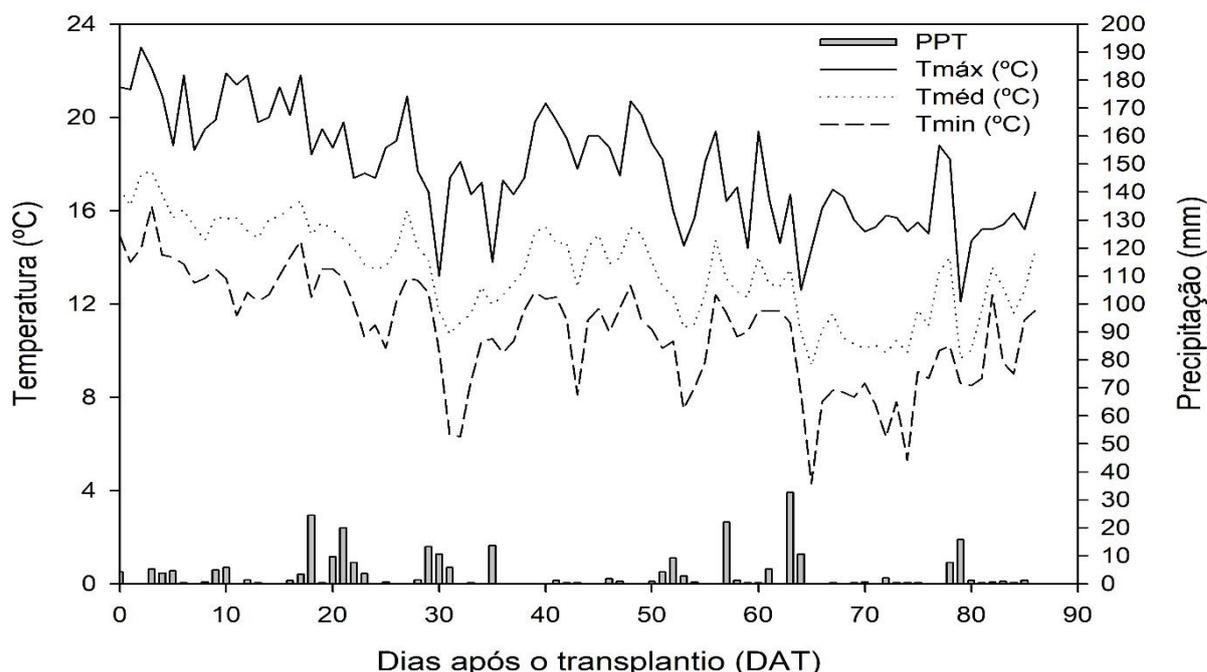


Figura 11. Registros diários de temperatura e umidade relativa (máximas, médias e mínimas) e precipitação durante o ciclo do brócolis em período compreendido de março a junho de 2018 em Petrópolis-RJ. Fonte: INMET (2018).

Não houve efeito significativo de interação entre tipo de corretivo e compostos usados na adubação sobre nenhuma das variáveis avaliadas. Sendo assim, os efeitos dos dois fatores foram analisados de forma independente.

Sintomas de hérnia das crucíferas foram observados em plantas de todos os tratamentos, mas em intensidade muito inferior à registrada no primeiro ensaio. O tipo de corretivo utilizado não afetou o desenvolvimento da doença das plantas nem a produtividade do brócolis (Tabela 7).

Nas condições em que este estudo foi realizado, a aplicação de cama de aviário, fresca ou compostada por 45 dias, aumentou significativamente a porcentagem de hérnias nas raízes com base na massa fresca (PMFRH) (7,27 a 13,78%), comparado à testemunha (2,97%), respectivamente. Entretanto, não houve diferença significativa entre aplicação da cama fresca ou compostada. Apesar deste efeito sobre a PMFRH, não houve diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos quanto ao efeito sobre a severidade, desenvolvimento radicular, volume de raiz sadia e massa seca de raiz, e sobre acúmulo de biomassa da planta, diâmetro e massa fresca das inflorescências e produtividade de brócolis (Tabela 7).

Tabela 7. Efeito da aplicação de calcário (PRNT = 91,26%; CaO = 39%; MgO = 11,0%) e escória de siderurgia (Ca = 25,0%, Mg = 6,0%, Si = 10,5%), e cama de aviário fresca (não compostada), compostada por 45 dias e testemunha (controle) sobre a severidade da hérnia das crucíferas, causada por *Plasmiodiophora brassicae*, porcentagem de hérnias nas raízes (PMFRH) volume de raiz sadia (mL), massa seca total das raízes e da planta (g), massa fresca (g) e diâmetro (cm) das inflorescências e produtividade de brócolis.

Corretivo ¹	Hérnia e crescimento radicular				Crescimento da planta e produção			
	Severidade (%)	PMFRH (%)	Raiz sadia (mL)	Massa seca de raiz (g)	Massa seca da planta (g)	Inflorescência		Produtividade (Mg ha ⁻¹)
						Massa Fresca (g)	Diâmetro (cm)	
Calcário	12,67 a	7,97 a	50,50 a	10,44 a	100,01 a	354,34 a	13,67 a	8,72 a
Escória	9,63 a	8,05 a	53,39 a	11,28 a	102,99 a	357,19 a	14,16 a	9,31 a
CV1(%)	16,51	9,37	14,86	19,96	13,43	22,08	21,71	18,98
Composto ²								
Cama fresca	14,06 a	13,78 a	54,93 a	11,75 a	105,00 a	352,65 a	13,18 a	8,78 a
Cama compostada	9,77 a	7,27 ab	55,42 a	11,12 a	98,92 a	367,52 a	14,24 a	9,20 a
Testemunha	9,68 a	2,97 b	45,48 a	9,71 a	100,59 a	347,16 a	14,32 a	9,06 a
CV2(%)	27,12	44,81	10,98	30,29	24,96	25,14	22,49	20,65

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ¹Os dados representam médias de 24 plantas. ² Os dados representam médias de 16 plantas.

Não houve efeito significativo da interação “corretivos x aplicação de cama de aviário” sobre os teores e acúmulo de nutrientes nas plantas (Tabela 8). Os fatores, portanto, foram analisados individualmente. Neste ensaio, os corretivos utilizados não afetaram significativamente a relação C/N, os teores médios de N, e o acúmulo de N, S, Ca, Mg, P e K nas plantas de brócolis. Os teores médios de S, por sua vez, foram superiores nas plantas onde se utilizou calcário como corretivo (Tabela 8). A utilização de cama de aviário fresca resultou em plantas de brócolis com menor relação C/N (8,18), comparado à cama de aviário compostada (8,26) e testemunha (8,50). Os maiores teores médios de N foram observados nas plantas adubadas com cama de aviário fresca, seguida por compostada, e por fim, as parcelas testemunha (sem cama de aviário). Os compostos não influenciaram os teores médios de S e acúmulo de nenhum dos macronutrientes analisados (Tabela 8). Estes resultados demonstram a influência da cama de aviário no aporte de nitrogênio mineral (biodisponível) às plantas e estão de acordo com as características do material a partir da análise de sua composição química, anteriormente citada.

Tabela 8. Efeito da aplicação de calcário (PRNT = 91,26%; CaO = 39%; MgO = 11,0%) e escória de siderurgia (Ca = 25,0%, Mg = 6,0%, Si = 10,5%), e cama de aviário fresca (não compostada), compostada por 45 dias e testemunha (controle) sobre a relação carbono / nitrogênio (C/N), teores de médios de N e S, e acúmulo de N, S, Ca, Mg, P e K em plantas de brócolis.

Corretivos ¹	Relação C/N	N		S		Ca	Mg	P	K
		g kg ⁻¹		g planta ⁻¹					
Calcário	8,03 a	44,84 a	10,37 a	4,49 a	1,03 a	2,75 a	0,424 a	0,646 a	4,94 a
Escória	8,15 a	43,63 a	9,59 b	4,51 a	0,99 a	2,54 a	0,426 a	0,666 a	5,62 a
CV1(%)	7,15	6,74	4,87	9,41	9	9,91	4,25	7,2	13,44
Composto ²									
Cama fresca	8,18 b	46,48 a	9,55 a	4,87 a	1,01 a	2,90 a	0,491 a	0,682 a	5,35 a
Cama compostada	8,26 a	43,40 ab	10,09 a	4,32 a	0,99 a	2,45 a	0,377 a	0,642 a	5,18 a
Testemunha	8,50 a	42,84 b	10,31 a	4,31 a	1,03 a	2,59 a	0,407 a	0,645 a	5,31 a
CV2(%)	7,21	6,4	11	27,86	26,28	30,89	27,78	27,78	27,42

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ¹Os dados representam médias de 24 plantas. ² Os dados representam médias de 16 plantas.

10. DISCUSSÃO

Os tratamentos com adubação verde produziram quantidades muito distintas de biomassa seca, destacando-se o milho (14,50 Mg ha⁻¹) em relação aos demais (2,10 a 3,55 Mg ha⁻¹) ($p \leq 0,05$) (Tabela 3). Esta maior quantidade de biomassa resultou em maior aporte de macronutrientes derivado da incorporação da biomassa das plantas pré-cultivadas. No entanto, as plantas de brócolis cultivadas nas áreas deste tratamento apresentaram menor crescimento radicular, inferior acúmulo de biomassa (Tabela 5) e de nutrientes nos tecidos (Tabela 6) devido, provavelmente, aos menores teores de N e maior relação C/N na palhada do milho: 11,08 g kg⁻¹ e 36,48, respectivamente (Tabela 5). A incorporação da biomassa de coentro e crotalária proporcionaram maior acúmulo de biomassa nas plantas de brócolis cultivadas em sucessão. As plantas de brócolis oriundas destes tratamentos apresentaram teores superiores de N (33,12 a 36,15 g kg⁻¹) e menores valores de relação C/N (9,26 a 9,76) comparado àquelas oriundas das parcelas com cultivo e incorporação do milho (29,20 g kg⁻¹ e 10,96) (Tabela 6). Estes resultados indicam, portanto, que o grande aporte de biomassa com alta relação C/N do milho pode ter imobilizado nutrientes, principalmente o N, para a cultura do brócolis cultivada em sucessão.

A composição química e a velocidade de decomposição dos resíduos orgânicos no solo têm implicações importantes na liberação de nutrientes para as plantas (SILVA, 2008). No cultivo de hortaliças de ciclo curto, como o brócolis, os nutrientes são exigidos em alta quantidade nos primeiros 60 dias do ciclo da cultura, principalmente, o N e o K (MELO, 2015; CASTRO & DEVIDE, 2018). Sendo assim, a incorporação da alta quantidade de biomassa do milho que continha elevada relação C/N pode ter resultado na imobilização do N mineral do solo e assim na sua baixa biodisponibilidade na fase inicial do ciclo da cultura de brócolis (MELO, 2015). Sabe-se que a velocidade de decomposição de resíduos orgânicos varia de um material para outro. Em geral, os materiais mais ricos em N e com menor relação C/N e teor de lignina são decompostos mais rapidamente no solo. Como os resíduos de gramíneas são mais pobres em N e mais lignificados, são mais lentamente processados pelos microrganismos do solo (GIACOMINI et al., 2003).

No presente estudo, coentro e crotalária, comparados ao milho, proporcionaram melhores respostas da cultura de brócolis quanto ao acúmulo de biomassa seca (Tabela 5). Ainda, as plantas de brócolis oriundas de áreas pré-cultivadas com coentro, seguidas das oriundas das de pré-cultivo de crotalária, apresentaram maiores concentrações de nutrientes nos tecidos e acúmulo de nutrientes como o nitrogênio (Tabela 6).

Estes resultados permitem inferir que características intrínsecas do material como a relação C/N tem efeitos predominantes, a curto prazo, em relação à quantidade de biomassa produzida e incorporada. A biomassa do coentro e da crotalária apresentaram menor relação C/N, indicando maior velocidade de decomposição e liberação dos nutrientes. A produção de biomassa seca de crotalária (3,55 Mg ha⁻¹) foi superior ao registrado por Silva et al. (2011) e inferior aos valores obtidos por Silva (2002), Santos (2009), Leal et al. (2012) e Corrêa et al. (2014), considerando-se a mesma espécie. Em comparação ao coentro, a crotalária apresentou maior biomassa seca, porém a sua decomposição pode ter ocorrido de forma mais lenta tendo em vista o alto teor de fibras apresentado por esta leguminosa, o que pode influenciar na sua velocidade de decomposição no solo (CASTRO & DEVIDE, 2018).

O menor crescimento das plantas de brócolis oriundas de áreas pré-cultivadas com milho demonstra baixa recuperação do N, S e P pela hortaliça. Este fato indica que, no manejo utilizado, não houve sincronia adequada entre a liberação de nutrientes oriundos dos resíduos do milho e a absorção pela cultura sucessora (ARAÚJO et al., 2011). Nos primeiros 60 dias após o transplante, as plantas de brócolis utilizam o nitrogênio, predominantemente, para crescimento vegetativo com emissão e expansão foliar (MELO, 2015). Deve ser considerado,

ainda, que no presente estudo o transplântio das mudas de brócolis foi realizado doze dias após a incorporação das culturas antecessoras. O fornecimento de N para o brócolis foi complementado por meio de adubação mineral no plantio ($25,2 \text{ kg ha}^{-1}$), e com aplicações em cobertura aos 20, 40 e 60 dias após o transplântio, na mesma dosagem. Mesmo com essa suplementação, ocorreu um decréscimo de produção de biomassa, o que pode estar associado às possíveis perdas por lixiviação de N em função da elevada precipitação observada durante o ciclo e relevo declivoso da região (Figura 10). Esta variável, no entanto, não foi mensurada no presente estudo.

Na literatura existem diferentes relatos de espécies, como alho-poró, centeio de inverno, azevém-perene, menta, alfavaca, bardana, cebolinha, salsa, cevada, ervilha e aveia, capazes de estimular a germinação dos esporos de *P. brassicae* ou de reduzir a severidade da doença em cultivos subsequentes (FRIBERG et al., 2006; HASSE et al., 2007; HWANG et al., 2015). No presente trabalho, este efeito esteve mais diretamente relacionado à melhoria do desenvolvimento radicular sadio do brócolis pelo maior aporte/disponibilidade de nutrientes, especialmente N, nos tratamentos com crotalária, seguido do coentro e da vegetação espontânea, comparado ao milho. O efeito positivo de N no desenvolvimento radicular de brássicas é relatado por Melo (2015) e Bhering et al. (2017). O possível efeito da incorporação das biomassas das plantas de adubo verde sobre a intensidade da hénria pode também ter sido reduzido pelas condições extremamente favoráveis à doença (pH < 5,84; temperaturas medianas e alta umidade devido à elevada precipitação) (DIXON, 2009a,b; GOSSSEN et al., 2014). Nota-se também que a severidade da doença foi elevada em todos os tratamentos com pré-cultivos, sendo superior a 40% (Tabela 5). No segundo ensaio, em área com histórico e densidade de inóculo similar, a intensidade da hénria foi inferior e, praticamente não interferiu no desempenho da cultura de brócolis. Estas diferenças estão relacionadas às condições edafoclimáticas contrastantes entre os dois ensaios: maior pH, pela aplicação dos corretivos no solo, menor temperatura, e boa e melhor distribuída precipitação no segundo ensaio comparado ao primeiro. Estes são dois fatores reportados na literatura como condicionantes ou favoráveis às infecções de *P. brassicae* em brássicas (DIXON, 2009a,b; DONALD & PORTER, 2009; GOSSSEN et al., 2014; BHERING et al., 2017).

Os efeitos e mecanismos envolvidos na incorporação da biomassa de plantas no manejo da hénria das crucíferas ainda não se encontram amplamente esclarecidos. Friberg et al. (2006), por exemplo, mencionam que o aumento do pH do solo resultante da incorporação de biomassa de plantas pré-cultivadas pode ser um dos mecanismos envolvidos na redução da severidade da doença em brássicas (FRIBERG et al., 2006). No presente estudo, a incorporação da biomassa de coentro, vegetação espontânea e crotalária resultaram em maiores valores de pH do solo (5,80, 5,84, 5,73, respectivamente), comparado à da biomassa de milho, cujo pH foi 5,61 (Tabela 4). Apesar disso, os efeitos observados nas raízes foram, majoritariamente, relacionados ao aumento do crescimento radicular sadio, expresso pelo volume da fração sadia das raízes, porém com pouca influência na redução da severidade da doença ou porcentagem de raízes com galhas (Tabela 5). Os efeitos observados foram, portanto, de caráter nutricional e com influência no crescimento da planta hospedeira.

Nas condições de realização deste ensaio, favoráveis à hénria das crucíferas e desfavoráveis ao cultivo de brócolis, resultados muito relevantes foram obtidos com o aumento do tamanho das mudas. Com a terceirização da produção de mudas e a busca de redução de custos de produção, a utilização de bandejas com maior número de células passou a ser uma prática comum na produção de várias hortaliças. Na produção comercial de brócolis, recomenda-se a produção de mudas em bandejas de 128, 162 e 200 células (MELO, 2015) com capacidade, respectivamente, para 35 cm^3 , 50 cm^3 e 16 cm^3 de substrato por célula. A utilização das bandejas de 200 células é a mais frequente pela economia de substrato, de espaço no viveiro de mudas e do tempo de permanência nas estufas dos

viveiristas. Os resultados obtidos neste trabalho permitem inferir que esta prática pode contribuir para acentuar as perdas pela hérnia das crucíferas. Ou ainda, que a utilização de mudas maiores pode contribuir para a redução das perdas pela doença. Neste ensaio, sob condições altamente favoráveis à hérnia das crucíferas (DIXON, 2009a,b; INMET, 2018), houve ganhos significativos com a utilização das mudas do tamanho 3 (bandeja de 128 células de 35 cm³ e idade de 28 dias) e tamanho 4 (bandeja de 162 células de 50 cm³ e idade de 32 dias) comparado aos dois tamanhos menores, tamanho 2 (bandeja de 200 células de 16 cm³ e idade de 24 dias) e tamanho 1 (bandeja de 288 células de 10 cm³ e idade de 20 dias). As plantas originárias de mudas maiores tiveram um desenvolvimento inicial mais rápido, maior volume radicular sadio e, proporcionalmente, menor severidade de hérnia das crucíferas e, conseqüentemente, maior acúmulo de nutrientes e de biomassa e maior produtividade (Tabelas 5 e 6).

No segundo ensaio, a utilização de tamanho único de mudas (35 cm³ e idade de 28 dias), associado às condições edafoclimáticas anteriormente discutidas, podem também ter sido responsáveis pelo melhor desempenho da cultura. A utilização de mudas maiores e com sistema radicular melhor estruturado pode ter reduzido o período inicial de exposição ao patógeno, considerada como uma etapa crítica para o desenvolvimento das plantas, além de ter compensado eventuais perdas de raízes pela doença. Esta prática pode também contribuir para a redução do ciclo ou do período crítico de exposição da planta ao patógeno, o que também contribui para a redução das perdas causadas pela doença (HWANG et al., 2011; HWANG et al., 2012b).

Vale ressaltar, no entanto, que a produtividade média obtida no primeiro ensaio (2,93 Mg ha⁻¹) foi baixa (MELO, 2015), o que pode estar relacionado às condições muito favoráveis à doença e pouco favoráveis à cultura: elevada precipitação e temperaturas registradas durante o ciclo (INMET, 2018). Este período, porém, corresponde à época de entressafra do brócolis e de melhores preços pagos aos produtores. Assim, mesmo com a baixa produtividade, a utilização de mudas maiores (Tamanhos 3 e 4), resultaram em acréscimos de mais de 170% na produtividade, massa e diâmetro das inflorescências, comparado aos tamanhos menores (Tabela 5). Como os tamanhos 3 e 4 resultaram em efeitos estatisticamente similares, a utilização do tamanho 3 (célula de 35 cm³ e idade de 28 dias), que requer menos substrato, pode ser preconizada como a alternativa mais econômica e segura para a cultura de brócolis nestas condições.

A elevação do pH do solo, fornecimento de cálcio e redução da fitotoxicidade de Al⁺³ são estratégias importantes no manejo da hérnia das crucíferas (DONALD & PORTER, 2009; SANTOS et al., 2017; 2020a). Desconhece-se, porém, o efeito do silício sobre a hérnia das crucíferas, apesar de já relacionado ao controle de diferentes doenças causadas por fungos, oomicetos e bactérias (CAI et al., 2009; POZZA et al., 2015). No presente ensaio, a utilização de escória de siderurgia, rica em silicato de cálcio, não variou de forma significativa em relação ao calcário quanto às alterações nos atributos químicos do solo, similar ao já reportado por Prezotti & Martins (2012). Ainda, não influenciou a intensidade da hérnia das crucíferas, acúmulo de biomassa e produtividade das plantas de brócolis (Tabela 7). Considerando as condições originais do solo, a escória de siderurgia promoveu, assim como o calcário, melhoria das condições de fertilidade. No entanto, com base nos resultados obtidos no presente estudo, não é possível inferir sobre potenciais efeitos do silício contido na escória de siderurgia sobre a redução de infecções por *P. brassicae* em brássicas, apenas sobre seu efeito como corretivo do solo.

A cama de aviário, geralmente é aplicada na forma fresca, é um insumo muito utilizado por produtores de brássicas na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro. Esta prática, associada à não correção da acidez do solo, foi sugerida por Bhering et al. (2017) e Bhering et al. (2020) como relacionada à alta intensidade de hérnia das crucíferas na região.

Esta hipótese pode ser reforçada com base nos resultados obtidos no presente trabalho, visto o aumento da porcentagem de massa radicular com galhas, especialmente ao ser aplicada a cama de aviário fresca (Tabela 7). No entanto, apesar da elevação da intensidade da doença e do maior aporte de nutrientes na aplicação de cama de aviário (Tabela 7), não houve reflexos significativos sobre o acúmulo de biomassa nas plantas de brócolis, nas inflorescências e na produtividade. A aplicação de cama de aviário fresca, porém, aportou maior quantidade de N e resultou em maior teor médio deste elemento nas plantas de brócolis, assim como menor relação C/N (Tabela 8).

Embora estes resultados reforcem a hipótese de Bhering et al. (2017 e 2020), resultados de outros autores como Lima (2019) indicam redução da doença com uso de cama de aviário fresca ou compostada, porém com maior ganho em massa das plantas com uso de cama de aviário fresca. Os autores atribuem esse efeito aos maiores teores de N mineral ($6,21 \text{ g kg}^{-1}$) (LIMA, 2019). Tendo em vista ao vasto uso deste insumo na produção de hortaliças, novos estudos visando elucidar as interações existentes entre tipo, quantidade e modo de aplicação deste composto e seus efeitos no processo de infecção de raízes de brássicas por *P. brassicae* necessitam ser realizados.

No presente estudo, desenvolvido em área com características típicas de agricultura de montanha em condições tropicais, o cultivo de brócolis em sucessão ao pré-cultivo e incorporação da biomassa de coentro ou crotalária se mostrou vantajoso por favorecer o crescimento radicular sadio das plantas de brócolis. O coentro, por ser uma espécie condimentar muito utilizada na culinária brasileira, é uma boa opção para planta de cobertura ou rotação com o brócolis. A crotalária, espécie leguminosa muito usada para adubação verde, também pode ser preconizada em sistemas de rotação com o brócolis. A utilização de mudas maiores em condições favoráveis à hérnia das crucíferas pode contribuir para a redução das perdas pela doença e assegurar a produção de brócolis em condições menos favoráveis à cultura ou mais favoráveis à doença. O uso de escória de siderurgia, rica em silicato de cálcio, apresentou efeito similar ao calcário como corretivo de acidez do solo, mas não se comprovou efeito do silicato de cálcio no controle da hérnia das crucíferas. A aplicação de cama de aviário contribuiu no aporte de nutrientes e no aumento de severidade da hérnia das crucíferas sem afetarem, porém, o acúmulo de biomassa, a qualidade e a produtividade de brócolis.

11. CONCLUSÕES

A incorporação de biomassa de crotalária, coentro, ou mesmo da vegetação espontânea, contribui para o aumento do sistema radicular sadio e para o acúmulo de biomassa nas plantas de brócolis; o mesmo benefício não é observado com a incorporação de milho.

A utilização de mudas maiores, célula de 35 cm³ ou 50 cm³ e idade de 28 ou 32 dias, em cultivos de verão, resultam em menor intensidade da hérnia das crucíferas, e maior produção de biomassa e produtividade de brócolis.

A aplicação de escória de siderurgia resulta em correção da acidez do solo e crescimento das plantas equivalentes à aplicação de calcário, mas sem afetar a intensidade da hérnia das crucíferas.

A utilização de cama de aviário, fresca ou compostada por 45 dias, aumenta a intensidade da hérnia das crucíferas.

CAPÍTULO III

METAIS TÓXICOS EM BRÓCOLIS PELO USO COMBINADO DE CORRETIVOS DA ACIDEZ E CAMA DE AVIÁRIO EM CONDIÇÕES TROPICAIS DE MONTANHA

RESUMO

Desenvolveu-se o presente trabalho com objetivo de avaliar a eficiência agrônômica e a segurança alimentar da utilização, isolada ou simultânea, de dois resíduos, escória de siderurgia e de cama de aviário, fresca ou compostada por 45 dias, no cultivo de brócolis (*Brassica oleracea* var. *italica*). Analisou-se a composição e o aporte de metais pelos diferentes tratamentos e os teores, a translocação e o acúmulo de Pb, Cd, Cu, Fe, Mn e Zn nos diferentes órgãos das plantas. Em seguida, avaliou-se os riscos à saúde humana associados ao consumo das inflorescências produzidas com base nos índices de ingestão diária estimada (IDE), coeficiente de risco-alvo não-cancerígeno (THQ), índice total de perigo (ITP) e fator de risco cancerígeno, considerando-se indivíduos adultos e crianças. A escória de siderurgia foi similar ao calcário quanto ao efeito corretivo da acidez e, apesar de conter metais tóxicos, não contribuiu para uma maior translocação destes metais para as inflorescências. A compostagem favoreceu a concentração de Pb, Cu e Zn na cama de aviário. O uso combinado de escória e cama de aviário fresca e, principalmente a cama de aviário compostada por 45 dias, favoreceu a absorção e translocação de Pb para as inflorescências, 60 e 66% de todo o Pb absorvido, respectivamente. A ingestão de inflorescências oriundas destes tratamentos resultou em valores críticos de ITP (1,03 e 1,52, respectivamente), sendo o Pb e Cd os metais que mais contribuíram para este risco. O risco cancerígeno (FRC) registrado foi superior ao limite de 10^{-6} . A utilização de escória de siderurgia associada à cama de aviário favorece a contaminação das inflorescências de brócolis, podendo aumentar os riscos à saúde humana com o seu consumo.

Palavras-chave: *Brassica oleracea* var. *italica*. Escória de siderurgia. Compostagem. Chumbo. Cádmiio.

ABSTRACT

The current study was developed to evaluate agronomic efficiency and food security of isolated or simultaneous use of two residues—steel slag and fresh or composted poultry litter for 45 days—in the cultivation of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*). The composition and contribution of metals by different treatments and contents, translocation, and accumulation of Pb, Cd, Cu, Fe, Mn, and Zn in different plant organs were analyzed. Then, risks to human health associated with consumption of inflorescences were evaluated based on indices estimated daily intake (EDI), non-carcinogenic target hazard quotient (THQ), total hazard index (THI), carcinogenic risk factor (CR), considering adults and children. Steel slag was similar to limestone in terms of the corrective effect of acidity and, despite containing toxic metals, it did not contribute to their higher translocation to inflorescences. Composting favored the concentrations of Pb, Cu, and Zn in poultry litter. The combined use of steel slag and fresh poultry litter and, mainly, composted poultry litter, favored absorption and translocation of Pb for inflorescences, that is, 60.37 and 66.13% of all Pb absorbed, respectively. Consumption of inflorescences from these treatments resulted in the critical THI values of 1.03 and 1.52, respectively, with Pb and Cd being the metals that mostly contributed to the risk. The registered CR was higher than the threshold level of 10^{-6} . The use of steel slag associated with poultry litter favors contamination of broccoli inflorescences and increases risks to human health due to their consumption.

Keywords: *Brassica oleracea* var. *italiac*. Steel slag. Composting. Lead. Cadmium.

12. INTRODUÇÃO

Brócolis (*Brassica oleracea* var. *italica*) é uma das principais hortaliças produzidas e consumidas no Brasil e no mundo (KUMAR et al., 2014; MELO, 2015; FAOSTAT, 2019). A área mundial plantada com brócolis e couve-flor (*B. oleracea* var. *botrytis*) gira em torno de 1.395.152 hectares, com uma produção de cerca de 25.984.758 toneladas anuais (FAOSTAT, 2019).

O cultivo do brócolis, assim como de outras plantas da família Brassicaceae, requer solos férteis e com $\text{pH} \geq 6,5$ (KUMAR et al., 2014; MELO, 2015). A elevação do pH também é essencial para o manejo da hérnia das crucíferas (*Plasmodiophora brassicae* Wor.), doença de difícil controle e responsável por grandes perdas em brassicáceas em diferentes partes do mundo (DIXON, 2009; BHERING et al., 2017). As plantas de *B. oleracea* apresentam alta capacidade de extração de nutrientes (MELO, 2015) e de metais tóxicos (GISBERT et al., 2006; MOURATO et al., 2015).

Como os solos das principais áreas de produção de brassicáceas no Brasil são ácidos e com baixos teores de matéria orgânica e de nutrientes (BHERING et al., 2017; SANTOS et al., 2017, 2020a), a calagem e a aplicação de fertilizantes orgânicos e minerais são necessárias para a produção de brócolis e de couve-flor (MELO, 2015; SANTOS et al., 2020a). Geralmente, o insumo recomendado para correção da acidez do solo é o calcário (SANTOS et al., 2017, 2020a), que é a rocha calcária moída e rica em carbonato de cálcio ou carbonato de cálcio e de magnésio. A escória de siderurgia, um dos resíduos da produção de aço no Brasil, também tem sido recomendada para correção da acidez do solo em áreas de produção de hortaliças (PRADO et al., 2002), de cana de açúcar e de arroz (NOBILE, 2009; VIDAL & PRADO, 2011; PREZOTTI & MARTINS, 2012). A escória de siderurgia é rica em CaSiO_3 e MgSiO_3 (NOBILE, 2009; PREZOTTI & MARTINS, 2012) e apresenta baixo custo em relação a outros corretivos da acidez do solo (NOBILE, 2009). Por conter Si, sua aplicação tem sido associada à redução dos danos causados por doenças em diferentes culturas agrícolas como arroz, cana-de-açúcar, feijão, tomate, abóbora e morango (POZZA et al., 2015).

Apesar das vantagens citadas, a escória de siderurgia contém metais tóxicos em sua composição, o que requer atenção quanto à sua recomendação (NOBILE, 2009; NING et al., 2016). Estes metais, normalmente, não são informados nas embalagens dos produtos comerciais. Ainda, inexitem informações sobre os processos envolvidos na absorção e translocação dos metais tóxicos aportados pela aplicação de escória de siderurgia em *B. oleracea* e, conseqüentemente, sobre a introdução destes metais na cadeia alimentar pelo consumo das inflorescências produzidas com uso deste corretivo (MOURATO et al., 2015; TAGHIZADEH et al., 2018).

A cama de aviário é outro resíduo abundante e muito utilizado como fertilizante orgânico na produção de hortaliças diversas (BHERING et al., 2017; PARENTE et al., 2019). Grandes quantidades deste resíduo são geradas nas granjas de criação de frango de corte no Brasil, um dos maiores países produtores e exportadores de carne de frango (ROGERI et al., 2016). A cama de aviário, recolhida ao final do ciclo de cada lote de aves, contém uma mistura de serragem de eucalipto usada na forração das granjas, resíduos das aves como fezes e penas, e sobras de ração. Este resíduo, apesar de rico em macronutrientes, como N, P e K, e micronutrientes como Zn, Cu, Fe e Mn (ROGERI et al., 2016), também pode conter metais tóxicos ou potencialmente tóxicos (BOLAN et al., 2010; PARENTE et al., 2019; SOUZA et al., 2019; SOUSA et al., 2020). Desta forma, o seu uso como fertilizante também poderia levar à contaminação do meio ambiente (BOLAN et al., 2010) e dos alimentos produzidos (COUTO et al., 2018), como já relatado em couve-flor (MATOS, 2016) e em tomate (SOUSA et al., 2020). Inexistem, porém, informações sobre o efeito da aplicação de cama de aviário

no acúmulo de metais em inflorescências de brócolis, bem como sobre o seu uso combinado com a escória de siderurgia.

A Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro (Brasil), onde se pratica agricultura tipicamente de montanha sob condições tropicais, representa um cenário peculiar para o estudo do impacto do uso de resíduos na produção e qualidade de hortaliças. Esta região possui um relevo muito acidentado e de alta declividade e com solos ácidos e de baixa fertilidade. Em compensação, é realizado alto aporte de adubos minerais e de cama de aviário, que mantém uma elevada produção de hortaliças diversas ao longo do ano em sistemas de manejo intensivo (BHERING et al., 2017; LIMA et al., 2018; PARENTE et al., 2019; SANTOS et al., 2020; SOUSA et al., 2020a). A cama de aviário é usada regularmente, muitas vezes sem prévia compostagem, há vários anos e em vários ciclos de cultivo por ano. Não existem, porém, estudos que atestem a sua segurança quanto ao aporte de metais e acúmulo nos alimentos produzidos, nem de estratégias para se minimizar estes impactos.

A avaliação e validação do uso destes resíduos na produção de alimentos pode ser baseada em diferentes aspectos, como melhoria da fertilidade do solo (NOBILE, 2009; VIDAL & PRADO, 2011; PREZOTTI & MARTINS, 2012; ROGERI et al., 2016), resposta fisiológica e fitotécnica das plantas (NOBILE, 2009; BOLAN et al., 2010), efeito no controle de doenças (POZZA et al., 2015; BHERING et al., 2017) e nos custos e viabilidade econômica. Entretanto, a segurança quanto aos riscos de contaminação do meio ambiente e dos alimentos por metais tóxicos também devem ser considerados. Como ambos os resíduos podem, potencialmente, conter metais tóxicos, a segurança de sua utilização em relação à qualidade dos alimentos deve também ser monitorada.

A contaminação dos alimentos por metais pode ser avaliada por diferentes índices. Alguns trabalhos avaliam os teores de metais nas partes comestíveis “*in natura*” e estima a ingestão diária por pessoa e os compara com os limites máximos estabelecidos por agências nacionais e internacionais (YANG et al., 2011; MATOS, 2016; YAACOB et al., 2018). Existem, porém, alguns índices e indicadores de referência dos riscos potenciais da ingestão de alimentos contaminados para a saúde de adultos e crianças (COUTO et al., 2018) como o coeficiente de risco não-carcinogênico individual por metal (THQ) e o risco total, envolvendo todos os metais presentes no alimento, (YANG et al., 2011; ISLAM et al., 2014; YAACOB et al., 2014; COUTO et al., 2018; FAN et al., 2018), além do risco cancerígeno (FRC) (ISLAM et al., 2014; COUTO et al., 2018).

Assim, desenvolveu-se o presente trabalho visando avaliar a eficiência agrônômica e a segurança alimentar da utilização, isolada ou simultânea, de dois resíduos para correção e adubação do solo na produção de brócolis. Os resíduos avaliados foram escória de siderurgia para correção da acidez dos solos, em substituição ao calcário; e a cama de aviário, fresca ou compostada, para adubação orgânica. Objetivou-se avaliar o aporte de metais, os teores, translocação e acumulação destes metais nas plantas e inflorescências de brócolis, e a qualidade alimentar das inflorescências quanto aos potenciais riscos à saúde humana com o uso combinado destes dois resíduos.

13. MATERIAL E MÉTODOS

13.1 Condições de realização do ensaio e insumos utilizados

O experimento foi realizado no período de dezembro de 2017 a junho de 2018, em área de produção de hortaliças no município de Petrópolis, localizado na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, Brasil (22°25'36.48"S 43°02'54.22"O, 1261 m). A área foi escolhida por ser representativa do cultivo de brócolis em regiões tropicais de montanha. O solo da área experimental é classificado como Cambissolo e apresentava, antes da aplicação dos corretivos, os seguintes atributos químicos: $\text{pH}_{(\text{água})} = 5,80$; $\text{Al}^{3+} = 0,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Ca}^{2+} = 4,20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Mg}^{2+} = 1,40 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{CTC} = 14,32 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; acidez potencial (H + Al) = $8,66 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{V}(\%) = 39,5\%$; P assimilável = $20,10 \text{ mg kg}^{-1}$; $\text{K}^+ = 216,9 \text{ mg kg}^{-1}$, e textura média.

Foram avaliados dois tipos de resíduos, sendo um para correção da acidez e outro para adubação orgânica, respectivamente. Para correção da acidez do solo foram utilizados: escória de siderurgia (Agrosilício Plus[®]) (Ca = 25,0%, Mg = 6,0%, Si = 10,5%) e calcário agrícola dolomítico (Mibita[®]) (PRNT = 91,26%; CaO = 39%; MgO = 11,0%). Para adubação orgânica foram utilizadas cama de aviário fresca ou não compostada (CAF) e aplicação da cama de aviário previamente compostada por 45 dias (CAC), mais um tratamento testemunha sem aplicação da cama de aviário.

Para definição das doses dos dois corretivos foi pré-estabelecido o pH de 6,5, adequado para a cultura do brócolis (MELO, 2015). Em seguida, com base em curva de neutralização, obtida através da incubação do solo com doses crescentes dos respectivos corretivos até a estabilização do pH (SANTOS et al., 2017), definiu-se a dose de $3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ da escória e de $3,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ do calcário. Os corretivos foram aplicados a lanço com posterior incorporação com enxada rotativa.

A cama de aviário, recém coletada na granja, foi homogeneizada e dividida em dois lotes. O primeiro lote foi mantido em câmara fria com temperatura ajustada para 10°C até a data do transplante e identificado como cama de aviário fresca (não compostada) (CAF). O segundo lote foi compostado em pilhas de 1,0 m de altura e com umidade mantida em 60%. As pilhas foram reviradas e umedecidas a cada sete dias até o final do processo, 45 dias. Aos 46 dias, foram coletadas amostras dos dois tipos de cama de aviário, CAF e CAC, para análises químicas e determinação dos teores de metais.

A CAF continha: $\text{pH} = 7,92$; condutividade elétrica (CE) = $2,13 \text{ dS m}^{-1}$; relação C/N = 16,88; $\text{N}_{\text{total}} = 19,00 \text{ g kg}^{-1}$. A CAC continha: $\text{pH} = 7,70$; CE = $3,21 \text{ dS m}^{-1}$; relação C/N = 17,75; $\text{N}_{\text{total}} = 16,13 \text{ g kg}^{-1}$.

Antes do transplante, 87 dias após a incorporação dos corretivos, coletaram-se amostras de solo na profundidade de 0-20 cm para posterior análise química de fertilidade (DONAGEMMA et al., 2011) e para análise dos teores pseudototais (ALLOWAY, 2013) e biodisponíveis (SOUSA et al., 2020) de Pb, Cd, Cu, Mn e Zn no solo.

A aplicação do adubo orgânico (CAF e CAC) foi realizada por ocasião do transplante das mudas de brócolis. A aplicação e a incorporação foram feitas diretamente nas covas de plantio utilizando-se a dose de 400 g, em base seca, por planta ($11,11 \text{ Mg ha}^{-1}$). No tratamento controle (testemunha), efetuou-se apenas a homogeneização do solo. Em todas as covas foi também aplicado ureia ($25,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de N), superfosfato simples (120 kg ha^{-1} de P_2O_5) e cloreto de potássio (48 kg ha^{-1} de K_2O).

13.2 Transplântio e condução da cultura

O delineamento utilizado foi em blocos ao acaso com quatro repetições em esquema de parcelas subdivididas. Os corretivos, escória de siderurgia e calcário, constituíram as parcelas. A adubação orgânica, CAF, CAC e testemunha, constituíram as subparcelas. Cada subparcela continha 24 plantas com 8 plantas centrais que foram utilizadas para as análises.

As mudas de brócolis, cultivar Avenger^H (Sakata), com 28 dias de idade, foram transplantadas aos 87 dias após a aplicação dos corretivos (DAC). Adotou-se o espaçamento de 0,60 (linhas) x 0,60 m (plantas).

O manejo da cultura se deu conforme práticas usuais adotadas pelos produtores da região. A irrigação ao longo do ciclo da cultura foi realizada por aspersão em turnos de três dias, em complementação às chuvas. Aos 16, 40 e 60 dias após o transplântio (DAT), foram realizadas adubações de cobertura com aplicação de 25,2 kg ha⁻¹ de N (ureia) e 48 kg ha⁻¹ de K₂O (cloreto de potássio), em cada uma delas. O controle de plantas daninhas foi feito com capina manual aos 40 DAT.

As colheitas foram realizadas aos 74, 79 e 86 DAT, à medida em que as inflorescências atingiam o ponto comercial (MELO, 2015), com corte rente na base do caule. Em seguida, com auxílio de pá reta, as raízes foram, cuidadosamente, retiradas visando manter a sua máxima integridade, lavadas em água corrente e, posteriormente, em água deionizada. A parte aérea foi seccionada e dividida em folhas, inflorescência e caule que foram lavados em água destilada e deionizada para as posteriores análises.

13.3 Análise do solo e caracterização química dos insumos

Para a determinação dos teores pseudototais de Pb, Cd, Cu, Mn e Zn nas amostras de solo foi utilizado o método EPA 3050B, descrito em USEPA (1996). A determinação da concentração dos metais nos extratos da digestão foi realizada em espectrofotômetro de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICPOES). Para os resultados analíticos que foram inferiores ao limite de quantificação (LQ), foi considerado como resultado na matriz de dados o valor LQ/2. O limite de detecção (LD) e o limite de quantificação foram calculados a partir das seguintes expressões:

$$LD = 3 \sigma (\text{tg } \alpha)^{-1} \quad E \quad LQ = LD.FD$$

Onde:

σ – desvio padrão de 10 leituras do branco;

$\text{tg } \alpha$ – inclinação da curva de calibração;

FD – fator de diluição das amostras após digestão

Os limites de detecção e de quantificação dos metais são apresentados no Apêndice B.

Para avaliar a qualidade das análises de solo, utilizou-se o material de referência NIST, SRM 2709a *San Joaquin Soil*, obtendo-se taxa de recuperação média de: 77,2%; 76,8%; 104,0%; 99,5%; 106,7%; 92,6%, para Pb, Cd, Cu, Mn e Zn, respectivamente.

A determinação da fração biodisponível dos metais no solo foi obtida através da extração com Mehlich I (H₂SO₄ 0,025N + HCl 0,05N), na proporção de 1:10, e leitura em espectrofotômetro de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

A quantificação dos teores de Pb, Cd, Cu, Fe, Mn e Zn nos insumos aplicados durante o ciclo de cultivo (corretivos, cama de aviário e adubos minerais) foi obtida de forma similar à determinação dos teores pseudototais de metais no solo. De posse dos teores e das doses aplicadas, foi calculada a quantidade aportada (g ha⁻¹) (Apêndice C).

13.4 Análise dos tecidos vegetais e determinação dos teores, translocação e acúmulo de metais

As amostras frescas de raiz, caule, folha e inflorescência foram pesadas para determinação da massa fresca. Em seguida, foram secas em estufa com circulação de ar forçado e temperatura ajustada para 65°C até peso constante, e novamente, pesadas para determinação da massa seca e a umidade das amostras.

As amostras secas foram moídas e usadas para determinação dos teores de metais nos tecidos. Para tanto, tomaram-se uma massa de 1,0 g de amostras que foram submetidas ao processo de digestão aberta em blocos digestores utilizando-se ácido nítrico conforme método 3050 (USEPA, 2008). Os teores de Pb, Cd, Cu, Fe, Mn e Zn foram determinados em espectrofotômetro de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICPOES). A qualidade das análises foi realizada utilizando-se amostra certificada NIST 1573a *Tomato Leaves*, obtendo-se taxa de recuperação média de 82,5%; 65,3%; 108,1%; 64,8%; 76,4%; 101,9% para Pb, Cd, Cu, Fe, Mn e Zn, respectivamente.

Tendo como base os teores encontrados e na massa seca, foram calculados os valores acumulados em cada órgão e na planta inteira. Ainda, calculou-se o índice de translocação de metais (IT%) para a parte aérea (total) e para o caule, folhas e inflorescência (ABICHEQUER & BOHNEN, 1998).

$$IT(\%) = \frac{\text{Quantidade acumulada na parte aérea ou no órgão}}{\text{Quantidade acumulada na planta inteira}} \times 100 \quad (1)$$

13.5 Análise estatística

Os teores pseudototais e biodisponíveis de metais no solo, teores nos tecidos e acúmulo nas plantas de brócolis foram submetidos à análise de variância (ANOVA). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Utilizou-se o *software* estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

13.6 Avaliação dos riscos à saúde humana

Os teores de metais nas inflorescências “*in natura*” (base úmida), foram confrontados com os teores máximos permitidos pela legislação brasileira (ANVISA, 1998 e 2013) e da União Européia (2006) visando determinar os riscos associados ao seu consumo. Foram calculados a ingestão diária estimada (IDE), o coeficiente de risco-alvo não-cancerígeno (THQ), o índice total de perigo (ITP) e fator de risco cancerígeno (FCR), considerando-se indivíduos adultos e crianças.

A IDE foi estimada de acordo com Fan et al. (2018):

$$IDE (mg \text{ kg p. c. d.}) = \left(\frac{C_{\text{metal}} \times W_{\text{food}}}{B_w} \right) / 1000 \quad (2)$$

Onde C_{metal} é a concentração de cada metal nas inflorescências “*in natura*” (mg kg⁻¹ de massa fresca); W_{food} é a quantidade do alimento ingerida diariamente (g dia⁻¹). O consumo médio de hortaliças consumidos por adultos é de 77 g dia⁻¹ (IBGE, 2010a) e, para crianças, o consumo médio foi estimado em 65% do valor consumido por um adulto (CANELLA et al., 2018). B_w é o peso corporal médio da população (Kg). Nas condições deste estudo, consideraram-se 70 kg e 30 kg o peso médio de um adulto e criança, respectivamente (IBGE, 2010b).

O coeficiente de risco-alvo não-cancerígeno (THQ) foi estimado de acordo com Yaacob et al. (2018) segundo o qual, relação $THQ < 1$ não representa risco de efeitos adversos à saúde humana:

$$THQ = \frac{IDE}{DOR} \quad (3)$$

Onde, DOR é a dose oral de referência [mg kg peso corporal (p.c.) d^{-1}]. Neste estudo, consideraram-se as doses de 0,0035; 0,001; 0,04; 0,7; 0,14; e 0,3 mg kg p.c. dia^{-1} , para Pb, Cd, Cu, Fe, Mn, e Zn, respectivamente (USEPA, 2010; JAVED & USMANI, 2016; SHAHEEN et al., 2016; FAN et al., 2018).

O índice total de perigo (ITP) foi obtido pelo somatório dos THQ's de todos os metais avaliados (ANTOINE et al., 2017), e possui a mesma interpretação.

$$ITP = THQ_{Pb} + THQ_{Cd} + THQ_{Cu} + THQ_{Fe} + THQ_{Mn} + THQ_{Zn} \quad (4)$$

O fator de risco cancerígeno (risco de câncer) oriundo da contaminação com Pb, foi calculado de acordo com Islam et al. (2014):

$$FRC = \frac{EFr \times ED \times W_{food} \times C_{metal} \times CSFo}{Bw \times AT} \times 10^{-3} \quad (5)$$

Onde, EFr é a frequência de exposição (365 dias/ano); ED é a duração da exposição (70 anos para adultos e 14 anos para crianças) equivalente à expectativa de vida média humana (SHAHEEN et al., 2016); W_{food} é a quantidade do alimento ingerida diariamente ($g \text{ dia}^{-1}$); C_{metal} é a concentração do metal na inflorescência fresca ($mg \text{ kg}^{-1}$ de massa fresca); Bw é o peso corporal médio de um adulto (kg); AT é o tempo médio para agentes cancerígenos ($365 \text{ dias ano}^{-1} \times ED$); CSFo é o fator oral de segurança dos contaminantes, que no caso do Pb é $0,0085 \text{ mg kg dia}^{-1}$, de acordo com o Sistema de Informação de Risco Integrado (USEPA, 2010).

14. RESULTADOS E DISCUSSÃO

14.1 Caracterização dos insumos e aporte de metais no solo

Detectou-se na escória de siderurgia a presença de Pb (14,79 mg kg⁻¹), Cd (2,31 mg kg⁻¹), Cu (13,88 mg kg⁻¹), Fe (25483,14 mg kg⁻¹), Mn (4562,13 mg kg⁻¹) e Zn (10,40 mg kg⁻¹). No calcário detectaram-se estes mesmos metais, mas, no geral, em menor concentração: Pb (6,13 mg kg⁻¹), Cd (2,68 mg kg⁻¹), Cu (2,66 mg kg⁻¹), Fe (600,33 mg kg⁻¹), Mn (15,94 mg kg⁻¹) e Zn (13,02 mg kg⁻¹) (Apêndice C). Estes mesmos metais também foram detectados na cama de aviário fresca e compostada, respectivamente: Pb (18,12 mg kg⁻¹ e 29,10 mg kg⁻¹), Cd (2,24 mg kg⁻¹ e 2,31 mg kg⁻¹), Cu (175,18 mg kg⁻¹ e 359,33 mg kg⁻¹), Fe (5427,60 mg kg⁻¹ e 5301,38 mg kg⁻¹), Mn (203,72 mg kg⁻¹ e 351,38 mg kg⁻¹) e Zn (157,28 mg kg⁻¹ e 313,21 mg kg⁻¹). Os teores de Pb, Cu, Mn e Zn encontrados na cama de aviário fresca foram inferiores aos encontrados na cama compostada por 45 dias. Nota-se, ainda, teores mais elevados de Pb, Cu e Zn na cama de aviário do que nos dois corretivos, principalmente, na compostada (Apêndice C).

Apesar de existirem grandes variações quanto ao teor de metais em cama de aviário procedentes de regiões ou granjas distintas e em função do sistema de produção (carne de frango ou postura) (ROGERI et al., 2016; PARENTE et al., 2019), os teores detectados neste trabalho são próximos aos descritos na literatura (SOUZA et al., 2019). Ou seja, o material utilizado é representativo quanto à composição deste resíduo, comumente, utilizado na produção de hortaliças. Estes teores de metais na cama de aviário advêm do tipo de dieta fornecido às aves, rações com adição de Cu, Zn, Mn, e Fe como probióticos, e de sais contendo impurezas (BOLAN et al., 2010; KPOMBLEKOU-A & MORTLEY, 2016). Com a compostagem, há um processo de concentração de metais na cama de aviário devido à perda de carbono na forma de CO₂ durante a mineralização (SOUZA et al., 2019).

Apesar da compostagem ser uma prática recomendada no manejo da cama de aviário visando à redução de possíveis microorganismos patogênicos e a produção de um material mais estabilizado (BOLAN et al., 2010), este processo contribui para o aumento da concentração de metais e, conseqüentemente, do aporte destes metais no solo. Considerando as doses utilizadas, este foi o insumo que mais contribuiu para o aporte de Pb (323,3 g ha⁻¹), Cu (3,99 kg ha⁻¹), Mn (3,90 kg ha⁻¹) e Zn (3,48 kg ha⁻¹) (Apêndice C). Em comparação ao material fresco, a compostagem por 45 dias contribuiu para um aumento de 37,7% de Pb; 51,23% de Cu; 42,02% de Mn; e 49,78% de Zn nos teores destes metais no material

A escória de siderurgia aportou maior quantidade de Fe e Mn, 89,19 e 15,96 kg ha⁻¹, respectivamente, seguido de cama de aviário fresca e compostada, com 60,30 e 58,90 kg ha⁻¹ de Fe e 2,26 e 3,90 kg ha⁻¹ de Mn, respectivamente. Considerando a combinação dos dois grupos de tratamentos, corretivos e adubos orgânicos, o aporte de metais em ordem decrescente foi: Fe>Mn>Cu>Zn>Pb>Cd. Pelo alto risco a saúde humana, ressalta-se o aporte de Pb (253,0 a 375,13 g ha⁻¹) e de Cd (33,0 a 33,77 g ha⁻¹) com a aplicação simultânea de escória de siderurgia e cama de aviário (Apêndice C).

14.2 Escória de siderurgia x calcário e os atributos químicos do solo e teores pseudototais e biodisponíveis de metais

Aos 87 dias após a aplicação dos corretivos, quando foi realizada a aplicação do adubo orgânico e o transplantio das mudas de brócolis, os solos dos dois tratamentos apresentaram valores distintos (p≤0,05) de pH e carbono orgânico total (Corg.). A aplicação de calcário elevou o pH de 5,8 para 6,2 e a de escória de siderurgia para 6,0. Este resultado deve-se,

provavelmente, à reação mais lenta da escória comparada à do calcário (NOBILE, 2009). O carbono orgânico total no solo aumentou de 23,11 mg kg⁻¹ para 24,10 mg kg⁻¹ e 28,57 mg kg⁻¹ nas áreas onde foram aplicados calcário e escória siderurgia, respectivamente. No processo de purificação do minério de ferro nas indústrias siderúrgicas, o carvão é adicionado ao alto-forno como agente redutor (NOBILE, 2009).

Os demais atributos químicos do solo foram similares e compatíveis com os recomendados para a cultura de brócolis (Al³⁺ = não detectado; Ca²⁺ = 7,94 a 8,12 cmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 4,09 a 4,10 cmol_c dm⁻³; CTC = 17,66 a 17,92 cmol_c dm⁻³; H + Al = 5,56 a 5,66 cmol_c dm⁻³; V(%) = 68,50 a 68,84%; P assimilável = 18,56 a 20,33 mg kg⁻¹; K⁺ = 185,44 a 205,42 mg kg⁻¹, respectivamente). Este resultado comprova a eficiência da escória como corretivo de acidez, conforme já relatado por Nobile (2009), Vidal e Prado (2011), Prezotti e Martins (2012) e Ning et al. (2016).

A aplicação de ambos os corretivos, escória de siderurgia e calcário, resultaram no enriquecimento do solo em Mn, Pb e Cd, comparados aos teores iniciais (Tabela 9). Teores estes que, em geral, estavam abaixo do limite de prevenção estabelecidos pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2009), em especial os teores pseudototais de Pb, Cd, Cu e Zn (Tabela 9). No entanto, os teores iniciais de Cu (45,10 mg kg⁻¹) e Zn (115,25 mg kg⁻¹) eram superiores aos valores de referência estabelecidos para a região (18 mg kg⁻¹ e 51 mg kg⁻¹, respectivamente) (LIMA et al., 2018), o que indica possível influência antropogênica.

Tabela 9. Teores pseudototais e biodisponíveis de Pb, Cd, Cu, Mn e Zn (mg kg⁻¹) no solo antes da aplicação dos corretivos (teores iniciais) e aos 87 dias após a aplicação de calcário e escória de siderurgia.

	Pb	Cd	Cu	Mn	Zn
	mg kg ⁻¹				
Teores pseudototais					
Teores iniciais	8,720	0,0340	45,10	387,38	115,25
Calcário	10,460 a	0,0124 a	43,46 a	443,45 a	95,79 a
Escória	9,649 a	0,4500 a	46,72 a	439,46 a	91,91 a
CV(%)	15,78	20,25	16,85	4,86	5,45
Teores biodisponíveis					
Teores iniciais	0,250	0,030	0,055	1,955	0,726
Calcário	0,575 b	0,0625 a	3,347 a	25,17 b	9,253 a
Escória	0,875 a	0,0691 a	3,434 a	33,25 a	9,884 a
CV(%)	22,53	15,65	18,42	24,01	23,2

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (p ≤ 0,05).

A aplicação dos dois corretivos resultou em aumento dos teores biodisponíveis de Pb, Cd, Cu, Mn e Zn no solo (Tabela 9). Os teores biodisponíveis de Pb e Cd resultantes da aplicação de escória de siderurgia foram 52,2% e 32,1%, respectivamente, maiores que o resultante da aplicação de calcário. Estes podem estar relacionados ao menor valor de pH (6,0) com a aplicação de escória comparada à aplicação de calcário (6,2) e, conseqüentemente, à maior biodisponibilidade destes dois metais. O valor de pH tem efeito direto na solubilidade e biodisponibilidade de metais divalentes, reduzindo cerca de 100 vezes com o aumento em uma unidade de pH (SPOSITO, 2008).

14.3 Teores, translocação e acúmulo de metais nas plantas de brócolis

Apesar do aporte de metais pelos tratamentos, não foram observados sintomas de fitotoxicidade, anomalias fisiológicas ou de deficiência nutricional nas plantas de brócolis. As

plantas apresentaram desenvolvimento normal, e boa produtividade e qualidade comercial das inflorescências, compatível com os relatos para a cultura na região e época de plantio (MELO, 2015; SANTOS et al. 2017, 2020a), e equivalente entre os tratamentos. Este resultado indica que, agronomicamente, o aporte de macro e micronutrientes foi adequado e que o de metais não foi prejudicial ao desenvolvimento das plantas.

Os teores de Pb, de forma geral, foram mais elevados nas raízes e inflorescências e menores no caule e nas folhas. Entretanto, efeito significativo dos tratamentos sobre os teores de Pb somente foi observado nas folhas e nas inflorescências (Figura 12a). A aplicação de calcário favoreceu a concentração de Pb nas folhas, principalmente, no tratamento calcário + cama de aviário compostada. Nas inflorescências, por sua vez, os teores de Pb não variaram significativamente, exceto entre o tratamento escória de siderurgia + cama de aviário compostada, com o teor mais elevado ($25,77 \text{ mg kg}^{-1}$ de massa seca), e calcário + cama de aviário compostada, com o menor teor ($10,03 \text{ mg kg}^{-1}$) (Figura 12a). Ou seja, apesar do maior aporte de Pb com a cama de aviário compostada, a concentração deste metal nas inflorescências foi mitigada com o uso do calcário, mas não com a aplicação de escória de siderurgia. Este resultado, possivelmente, deve-se ao menor aporte de Pb com o uso de calcário, e maior valor de pH alcançado com o uso deste corretivo, o que reduziu a biodisponibilidade do Pb (SPOSITO, 2008; GALL et al., 2015). A biodisponibilidade e o comportamento químico do Pb no solo também dependem muito da matéria orgânica (ALLOWAY, 2013) em vista de sua alta afinidade com grupos funcionais de substâncias húmicas na matéria orgânica do solo (SHAHID et al., 2012). Os ácidos fúlvicos e outros ácidos orgânicos de baixo peso molecular da matéria orgânica podem formar complexos solúveis com metais, aumentando a biodisponibilidade (SILVA et al., 2017; SOUSA et al., 2020). Quando esses complexos são absorvidos pelas plantas, eles podem ser armazenados em tecidos vegetais como compostos de baixa fitotoxicidade ou inativos (SHAHID et al., 2012; BOLAN et al., 2014; SILVA et al., 2017).

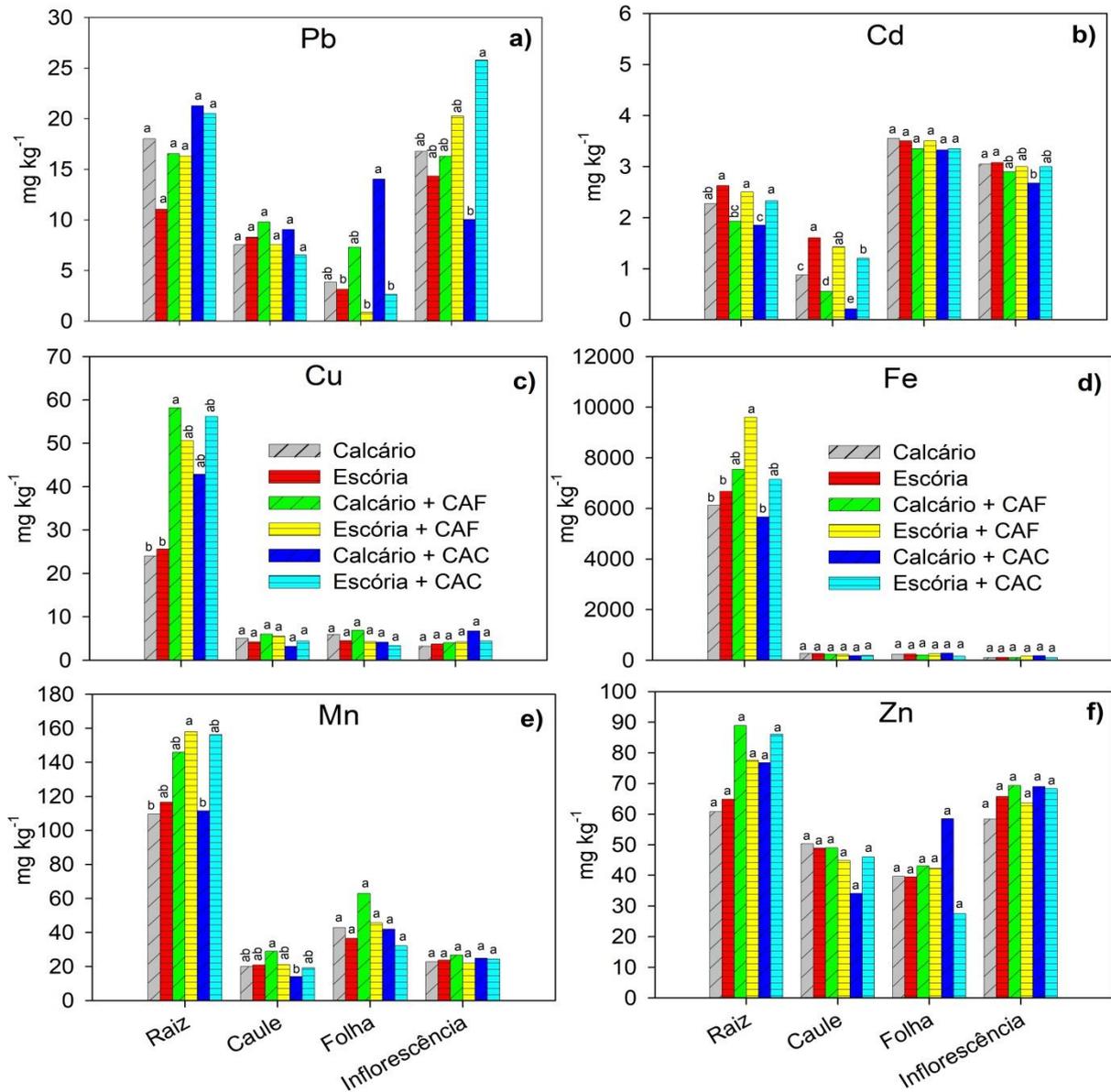


Figura 12. Teores de Pb (a), Cd (b), Cu (c), Fe (d), Mn (e) e Zn (f) nas raízes, caule, folhas e inflorescências de plantas de brócolis em função da aplicação isolada de calcário e escória de siderurgia e de sua aplicação combinada com cama de aviário fresca (CAF) e compostada por 45 dias (CAC). *Para cada metal e órgão, médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$).

Quanto ao Cd, observaram-se maiores teores nas folhas e inflorescências e menores nas raízes e, principalmente, no caule (Figura 12b). O Cd é citado por sua alta mobilidade e transferência para a parte aérea, além do acúmulo pronunciado nas folhas, o que o torna um risco evidente principalmente em vegetais folhosos (YAACOB et al., 2018). De forma geral, tanto nas raízes como no caule, os maiores teores de Cd foram detectados nos tratamentos com escória de siderurgia comparado ao calcário. Note-se, ainda, que há uma redução dos teores de Cd nas raízes e no caule com a aplicação da cama de aviário fresca e, principalmente, da compostada e, que este efeito é mais acentuado nas parcelas tratadas com calcário do que com escória. Nas folhas e inflorescências, apesar dos maiores teores, praticamente não houve variações em função dos tratamentos. Observou-se apenas uma discreta redução dos teores de Cd nas inflorescências com a aplicação de calcário + cama de

aviário compostada (Figura 12b), decorrentes do maior valor de pH, como explicado anteriormente. Este metal possui solubilidade fortemente relacionada à acidez do solo (ALLOWAY, 2013).

Para o Cu (Figura 12c), Fe (Figura 12d) e Mn (Figura 12e) observaram-se concentrações mais elevadas nas raízes nos tratamentos com maior aporte destes três metais, ou seja, nos tratamentos que continham cama de aviário. Neste grupo de tratamentos, porém, há uma redução da concentração de Cu, Fe e Mn nas raízes com a aplicação combinada de calcário + cama compostada. Para estes três metais, observa-se baixa concentração nos órgãos aéreos, principalmente de Cu e Fe, e nenhuma variação em função dos tratamentos (Figuras 12c,d,e). Para o Zn, observaram-se concentrações ligeiramente superiores nas raízes e inflorescências comparados ao caule e às folhas, e nenhum efeito significativo dos tratamentos (Figura 12f). Apesar disso, as concentrações de Zn nos tecidos são geralmente constantes em comparação com outros metais (ALLOWAY, 2013).

Os teores de Zn, Pb e Cd nas folhas; e de Cu, Fe, Zn, Pb e Cd nas raízes foram superiores aos observados por Radulescu et al. (2013) ao analisarem plantas de repolho (*B. oleracea* var. *capitata*). Santos et al. (2018b) analisaram plantas de couve-flor e encontraram os teores de 3,73 mg kg⁻¹ de Cu nas folhas, 37,34 mg kg⁻¹ de Zn nas inflorescências e; 9,65 mg kg⁻¹ de Cu, 51,99 mg kg⁻¹ de Mn e 59,66 mg kg⁻¹ de Zn nas raízes. Estes teores são bem inferiores aos valores registrados no presente trabalho.

Considerando os seis metais estudados e a dinâmica dos mesmos nas plantas, constatam-se diferenças entre os mesmos quanto à translocação para a parte aérea e para as inflorescências de brócolis. Em média, os maiores índices de translocação para a parte aérea foram, em ordem decrescente, de: Cd (91,52%), Zn (84,44%), Pb (81,79%), Mn (69,94%), Cu (50,23%) e Fe (21,01%) (Figura 13). As menores taxas de translocação de Mn e, principalmente, de Cu e Fe, também podem ser explicadas como resultado de um mecanismo de bloqueio parcial da planta. Algumas plantas são capazes de compartimentar o excesso de metais em suas raízes, ligando-os a ácidos orgânicos ou aglutinantes, ou armazenando-os nos vacúolos (ALLOWAY, 2013; GALL et al., 2015).

Não houve, porém, variações em função dos tratamentos, exceto para o Cu cuja translocação para a parte aérea foi, ligeiramente, menor nos tratamentos com cama de aviário, especialmente a compostada (Figura 13). Em geral, a matéria orgânica do solo influencia a adsorção específica de Cu no solo e sendo a principal responsável pela retenção do Cu adsorvido (Alloway 2013).

Houve, porém, diferenças entre os metais quanto à sua distribuição nos três órgãos, com a alocação do Pb principalmente nas inflorescências (25,36 a 66,66%); de Cd (52,36 a 61,90%), Cu (19,16 a 43,99%), Fe (8,56 a 14,92%) e Mn (40,53 a 54,97%), principalmente, nas folhas; e de Zn nas folhas (30,77 a 43,20%) e inflorescências (31,52 a 38,61%). Destaca-se a alta acumulação do Pb absorvido nas inflorescências, especialmente nos tratamentos com escória de siderurgia + cama de aviário fresca (60,41%) e escória de siderurgia + cama compostada (66,66%). Menor translocação para as inflorescências foi observada no tratamento contendo calcário + cama de aviário compostada (25,36%) com alocação predominante do metal nas folhas (47,97%) (Figura 13a).

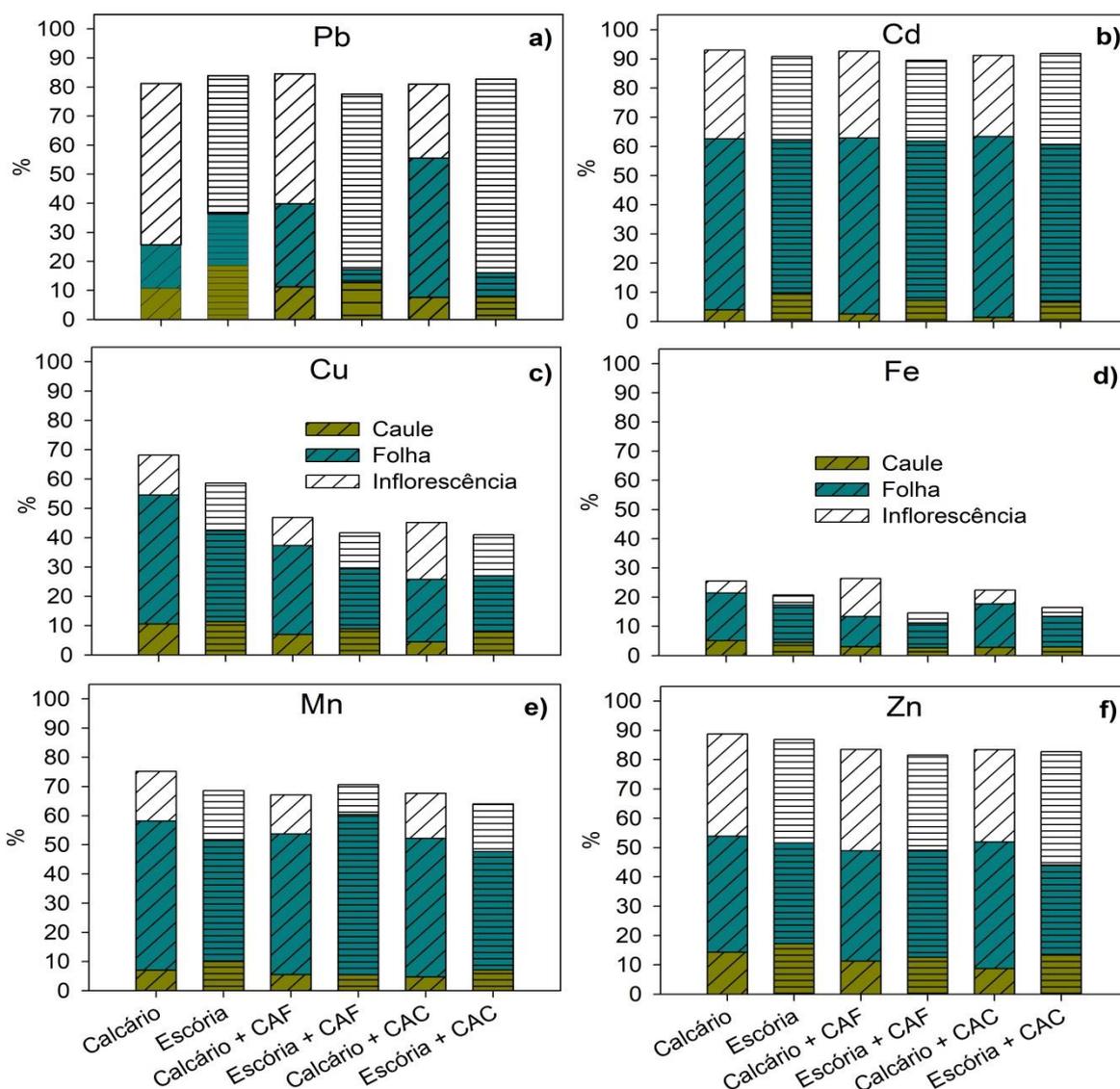


Figura 13. Porcentagem de Pb (a), Cd (b), Cu (c), Fe (d), Mn (e) e Zn (f) translocados para a parte aérea de plantas de brócolis, caule, folhas e inflorescência, em função da aplicação de calcário e escória de siderurgia isoladamente e combinada com a aplicação de cama de aviário fresca (CAF) ou compostada por 45 dias (CAC).

O acúmulo dos seis metais na planta e em seus diferentes órgãos (Figura 14) seguiu o mesmo padrão da concentração (Figura 12) e translocação, e distribuição (Figura 13). O acúmulo de Pb foi, principalmente, nas inflorescências (19,60 a 66,13%), seguido das folhas (4,91 a 52,32%) (Figura 14a). Entretanto, o acúmulo de Cd foi principalmente, nas folhas (53,38% a 62,59%) e nas inflorescências (27,08 a 30,63%) (Figura 14b). O Cu acumulou em maior quantidade nas folhas (19,88 a 43,63%) e raízes (31,57 a 59,52%) (Figura 14c). O Fe acumulou-se, principalmente, nas raízes (75,91 a 83,56%) e nas folhas (8,87 a 14,80%) (Figura 14d). O acúmulo de Mn foi maior nas raízes (23,80 a 36,08%) e folhas (41,87 a 60,42%) (Figura 14e), enquanto o Zn acumulou em maior quantidade no caule (27,81 a 38,06%) e raízes (31,33 a 50,14%) (Figura 14f).

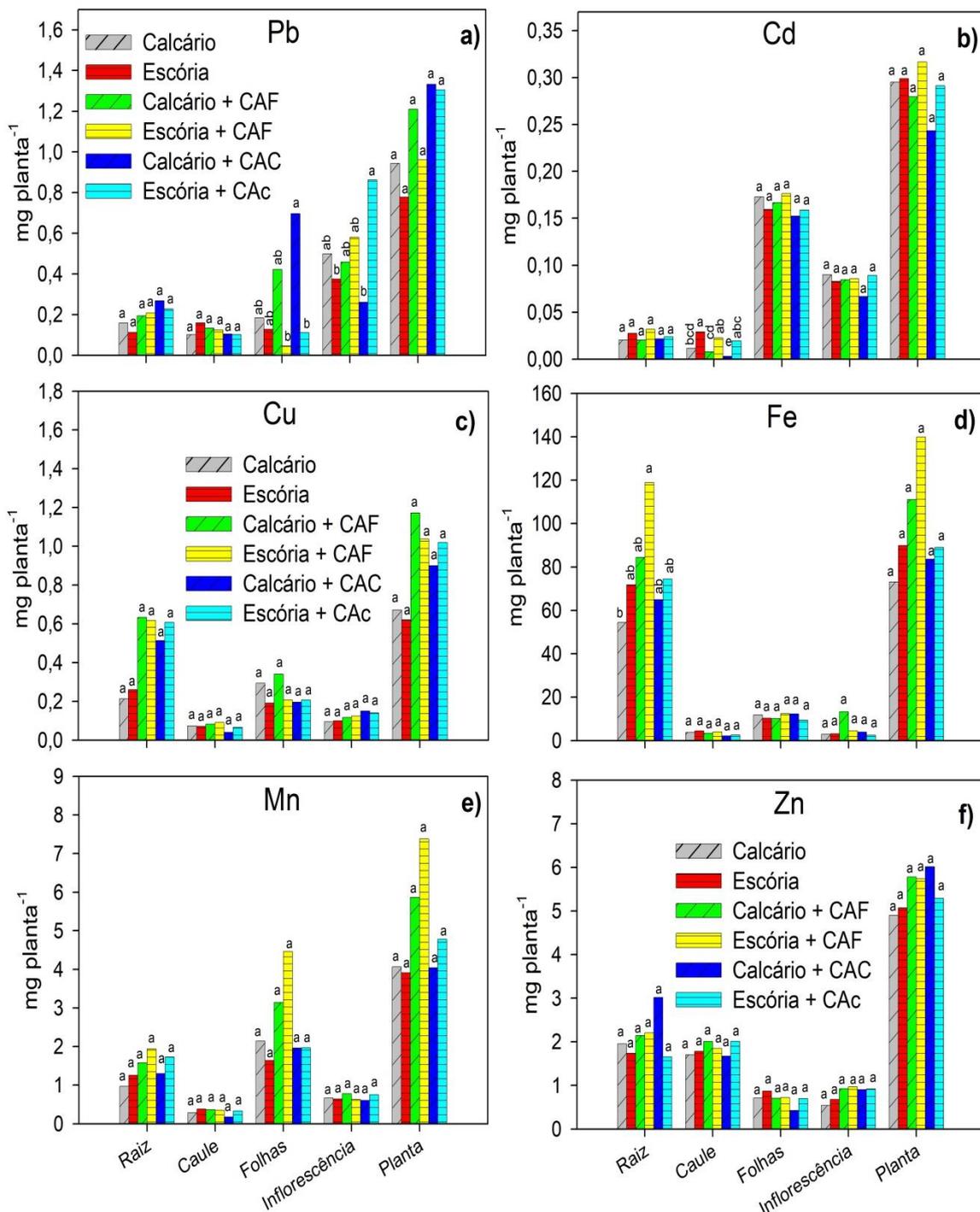


Figura 14. Valores acumulados de Pb (a), Cd (b), Cu (c), Fe (d), Mn (e) e Zn (f) nas raízes, caule, folhas, inflorescências e total em plantas de brócolis em função da aplicação de calcário e escória de siderurgia isoladamente e combinada com a aplicação de cama de aviário fresca (CAF) ou compostada por 45 dias (CAC). *Para cada metal e órgão, médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$).

De forma geral, não houve efeito significativo dos tratamentos sobre a quantidade total acumulada dos diferentes metais nas plantas e nem sobre a quantidade de Cu, Mn e Zn acumulada nos diferentes órgãos da planta (Figura 14). Maior acúmulo de Cd no caule se deu nos tratamentos contendo escória de siderurgia (Figura 14b). A combinação de escória e cama de aviário fresca resultou em alta acumulação de Fe nas raízes (Figura 14d). No tocante ao Pb,

o acúmulo nas folhas foi, significativamente, maior no tratamento calcário + cama de aviário compostada (52,32%) e menor nas inflorescências (19,60%). Por outro lado, a associação escória de siderurgia + cama de aviário fresca e, principalmente, a compostada, resultou em maior acúmulo de Pb nas inflorescências (60,37 a 66,13%) em detrimento do acúmulo nas folhas (4,91 a 8,54%) (Figura 14a). Este resultado deve-se tanto ao aporte adicional de Pb pela cama de aviário (Apêndice C) como ao efeito decorrente da transformação da matéria orgânica oriunda da cama de aviário e a formação de complexos solúveis de fácil absorção e translocação para a parte aérea (SHAHID et al., 2012; BOLAN et al., 2014; PARENTE et al., 2019). Estes complexos solúveis podem ser facilmente formados entre o Pb e ácidos fúlvicos e outros ligantes orgânicos de menor peso molecular presentes na solução do solo decorrentes da transformação da cama de aviário (BOLAN et al., 2014). Silva et al. (2017) observaram que substâncias húmicas com predomínio de cadeias alifáticas, contendo principalmente grupos carboxílicos e hidroxila, apresentaram alta capacidade de formar complexos solúveis com Pb e de atuar como agentes quelantes, facilitando a absorção pelas plantas. Uma alta translocação de Pb para frutos de tomate (SOUSA et al., 2020) e inflorescências de couve-flor (MATOS, 2016) também foi associada à aplicação de cama de aviário nesta mesma região.

Apesar da aplicação de escória de siderurgia ter resultado em aumento dos teores biodisponíveis de Pb no solo (Tabela 9) isto não resultou em maior translocação e aumento dos teores e acúmulo de Pb nas folhas e inflorescências, exceto quando associada à aplicação de cama-de-aviário (Figuras 12a, 13a e 14a). Resultado similar foi observado para a cultura da cana-de-açúcar (PREZOTTI & MARTINS, 2012), onde a aplicação de escória de siderurgia elevou o pH do solo e neutralizou o alumínio tóxico sem alterar os teores de Cd, Pb e Ni no solo, mesmo em doses mais elevadas (10 a 40 Mg ha⁻¹). Não foi registrado aumento considerável nos teores de metais nas plantas de cana-de-açúcar (PREZOTTI & MARTINS, 2012). Ou seja, a aplicação isolada de escória de siderurgia parece ser segura, mesmo em brócolis, espécie da família Brassicaceae, onde normalmente se observa potencial de acúmulo de metais tóxicos (GISBERT et al., 2006; RADULESCU et al., 2013; MOURATO et al., 2015; MATOS, 2016; TAGHIZADEH et al., 2018), principalmente nas inflorescências (Figuras 12a, 13a e 14a).

14.4 Riscos à saúde humana

Os teores de Cu (0,26 a 0,43 mg kg⁻¹ na massa fresca das inflorescências), foram baixos e em conformidade com os limites máximos permitidos pela Anvisa (1998), que é 10,0 mg kg⁻¹ de massa fresca (Tabela 10). Para os metais Fe, Mn e Zn ainda não foram disponibilizados limites normativos máximos e estes, portanto, não puderam ser comparados. No entanto, os teores médios destes metais e de Cu nas inflorescências *in natura* foram próximos aos valores constantes na Tabela Brasileira de Composição de Alimentos, sendo 0,6; 6,0; 2,6; e 5,0 mg kg⁻¹ massa fresca, respectivamente (TACO, 2011). Ao contrário do Pb e do Cd, esses metais (Cu, Fe, Mn e Zn) são considerados micronutrientes em condições adequadas. Apesar disso, quando em concentrações muito elevadas, também podem ser potencialmente tóxicos para a saúde humana, conforme mencionado por Gall et al. (2015), Javed e Usmani (2016), Shaheen et al. (2016) e Couto et al. (2018).

Entretanto, nos seis tratamentos, os teores de Pb foram superiores ao limite máximo permitido pela União Européia (2006) e pela Anvisa (2013), 0,30 mg kg⁻¹ de massa fresca. A combinação da escória com a cama de aviário fresca e, principalmente com a cama compostada, resultou em teores ainda mais elevados (1,635 mg kg⁻¹ e 2,177 mg kg⁻¹), ou seja 4,45 e 6,25 vezes superior ao limite estabelecido, respectivamente. Os teores de Cd em todos os tratamentos também são superiores ao limite estabelecido pelas duas agências. Estes

variaram de 0,194 a 0,252 mg kg⁻¹ de massa fresca, ou seja, 2,88 a 4,04 vezes o estabelecido que é de 0,05 mg kg⁻¹ de massa fresca (Tabela 10).

A contaminação de couve-flor por Pb e Cd nesta mesma região e sua associação à aplicação recorrente de cama de aviário foi feita por Matos (2016), seja pelo alto aporte de Pb como pela formação de complexos orgânicos solúveis que podem favorecer a sua translocação para as inflorescências (SHAHID et al., 2012; BOLAN et al., 2014, SOUZA et al., 2019), conforme discutido anteriormente.

No entanto, apesar dos teores de Pb e de Cd serem superiores aos limites previstos para alimentos, a ingestão diária de todos os metais, expressa em mg kg⁻¹ de peso corporal (p.c.) dia, tanto para adultos como crianças, estão abaixo das doses orais de referência utilizadas (USEPA, 2010; JAVED & USMANI, 2016; SHAHEEN et al., 2016; FAN et al., 2018) (Tabela 10). Excetuam-se apenas as inflorescências do tratamento escória + cama de aviário compostada que levaria a uma taxa de ingestão diária acima da considerada segura para crianças (0,0036 mg kg⁻¹ p. c. dia). Por conseguinte, os coeficientes de risco-alvo (THQ) dos diferentes metais foram adequados (THQ < 1,0), exceto o de Pb para crianças (THQ =1,03) pela ingestão de inflorescências oriundas no tratamento escória + cama de aviário compostada (Tabela 10).

Tabela 10. Teores de Pb, Cd, Cu, Fe, Mn e Zn nas inflorescências *in natura* de brócolis (mg kg⁻¹ massa fresca) cultivado com a utilização de calcário ou escória de siderurgia combinados à cama de aviário fresca (CAF) ou compostada (CAC); dose oral de referência; valores estimados de ingestão diária (IDE), expresso em mg kg⁻¹ de peso corporal (p.c.) dia; e coeficiente de risco-alvo (THQ), considerando-se indivíduos adultos e crianças.

Tratamentos ^a	Teores (mg kg ⁻¹ m.f.)	Dose oral de referência (mg kg ⁻¹ p.c. dia)	IDE		THQ ^b	
			(mg kg ⁻¹ p. c. dia)		IDE / Dose oral de referência	
			Adultos	Crianças	Adultos	Crianças
Pb						
Calcário	1,361		0,0015	0,0023	0,428	0,648
Escória	1,153		0,0013	0,0019	0,362	0,549
Calcário + CAF	1,393	0,0035	0,0015	0,0023	0,438	0,664
Escória + CAF	1,635		0,0018	0,0027	0,514	0,779
Calcário + CAC	0,751		0,0008	0,0013	0,236	0,358
Escória + CAC	2,177		0,0024	0,0036	0,684	1,037
Cd						
Calcário	0,247		0,0003	0,0004	0,272	0,412
Escória	0,252		0,0003	0,0004	0,277	0,420
Calcário + CAF	0,248	0,001	0,0003	0,0004	0,272	0,413
Escória + CAF	0,242		0,0003	0,0004	0,267	0,404
Calcário + CAC	0,194		0,0002	0,0003	0,214	0,324
Escória + CAC	0,238		0,0003	0,0004	0,262	0,397
Cu						
Calcário	0,261		0,0003	0,0004	0,007	0,011
Escória	0,308		0,0003	0,0005	0,008	0,013
Calcário + CAF	0,343	0,04	0,0004	0,0006	0,009	0,014
Escória + CAF	0,336		0,0004	0,0006	0,009	0,014
Calcário + CAC	0,439		0,0005	0,0007	0,012	0,018
Escória + CAC	0,351		0,0004	0,0006	0,010	0,015
Fe						
Calcário	8,168		0,0090	0,0136	0,0128	0,0194
Escória	9,622		0,0106	0,0160	0,0151	0,0229
Calcário + CAF	9,041	0,7	0,0099	0,0151	0,0142	0,0215
Escória + CAF	12,438		0,0137	0,0207	0,0195	0,0296
Calcário + CAC	10,807		0,0119	0,0180	0,0170	0,0257
Escória + CAC	8,326		0,0092	0,0139	0,0131	0,0198
Mn						
Calcário	1,847		0,0020	0,0031	0,015	0,022
Escória	1,934		0,0021	0,0032	0,015	0,023
Calcário + CAF	2,276	0,14	0,0025	0,0092	0,018	0,066
Escória + CAF	1,754		0,0019	0,0029	0,014	0,021
Calcário + CAC	1,735		0,0019	0,0029	0,014	0,021
Escória + CAC	1,940		0,0021	0,0032	0,015	0,023
Zn						
Calcário	4,721		0,0052	0,0079	0,017	0,026
Escória	5,391		0,0059	0,0090	0,020	0,030
Calcário + CAF	5,943	0,3	0,0065	0,0099	0,022	0,033
Escória + CAF	5,113		0,0056	0,0085	0,019	0,028
Calcário + CAC	4,748		0,0052	0,0079	0,017	0,026
Escória + CAC	5,379		0,0059	0,0090	0,020	0,030

^a CAF = Cama de aviário fresca; CAC = Cama de aviário compostada.

^b THQ < 1 não representa risco de efeitos adversos à saúde humana (Yaacob et al., 2018).

No entanto, apesar de os índices de risco calculados para cada metal estarem em geral compatíveis (THQ<1) (YAACOB et al., 2018), o risco à saúde humana advindo do somatório de todos os metais é crítico (ITP >1,0) (ANTOINE et al., 2017; YAACOB et al., 2018) em duas situações: 1) para adultos com o consumo de inflorescências do tratamento escória + cama de aviário compostada e; 2) para crianças pelo consumo de inflorescências de todos os tratamentos, exceto calcário + cama de aviário compostada (Tabela 11). Para crianças, o ITP variou de 0,77 a 1,52, o que denota riscos potenciais, especialmente no tratamento com escória de siderurgia + cama de aviário compostada (Tabela 11). O Pb e o Cd foram os dois metais que mais contribuíram para a elevação do risco total de perigo (ITP) pela ingestão de inflorescências de brócolis. Este resultado foi similar ao relatado por Yang et al. (2011) para o consumo de hortaliças na China ao analisarem os riscos associados à contaminação por Pb, Zn, Mn, Cu, Cd e Cr.

Nesse estudo, o risco cancerígeno (FRC) em função da exposição a longo prazo por contaminação por Pb em indivíduos adultos variaram de $7,02 \times 10^{-6}$ a $2,03 \times 10^{-5}$. Para crianças, os valores variaram de $1,06 \times 10^{-5}$ a $3,08 \times 10^{-5}$. Em ambos os cenários os valores foram superiores ao valor limiar de $1,0 \times 10^{-6}$ e inferiores aos valores inaceitáveis de $1,0 \times 10^{-4}$ (USEPA 1989, 2010). Valores de FRC iguais a 10^{-6} e 10^{-4} são equivalentes a um caso de câncer a cada 1.000.000 e 10.000 pessoas, respectivamente (SHAHEEN et al., 2016). O pior cenário foi observado com a ingestão de inflorescências produzidas com o uso combinado de escória de siderurgia + cama de aviário compostada (Tabela 11).

Tabela 11. Índice total de perigo (ITP) para indivíduos adultos e crianças, considerando-se somatório dos coeficientes de risco-alvo de todos os metais, e fator de risco cancerígeno (FRC) em função da exposição a Pb.

Tratamentos ^a	Indivíduos	ITP ^b	FRC ^c
Calcário	Adultos	0,75	$1,27 \times 10^{-5}$
Escória		0,70	$1,07 \times 10^{-5}$
Calcário + CAF		0,77	$1,30 \times 10^{-5}$
Escória + CAF		0,84	$1,52 \times 10^{-5}$
Calcário + CAC		0,51	$7,02 \times 10^{-6}$
Escória + CAC		1,03	$2,03 \times 10^{-5}$
Calcário	Crianças	1,14	$1,93 \times 10^{-5}$
Escória		1,06	$1,63 \times 10^{-5}$
Calcário + CAF		1,21	$1,97 \times 10^{-5}$
Escória + CAF		1,28	$2,31 \times 10^{-5}$
Calcário + CAC		0,77	$1,06 \times 10^{-5}$
Escória + CAC		1,52	$3,08 \times 10^{-5}$

^a CAF = Cama de aviário fresca; CAC = Cama de aviário compostada.

^b ITP<1 não representa risco de efeitos adversos à saúde humana (Antoine et al., 2017).

^c Valores de FRC < 10^{-6} apresentam efeito nulo e FRC > $1,0 \times 10^{-4}$ são inaceitáveis (USEPA, 1989, 2010; Islam et al., 2014; Shaheen et al., 2016).

Apesar dos teores elevados de Pb e Cd nas inflorescências, especialmente nos tratamentos com escória e cama de aviário compostada, ou cama de aviário fresca, os índices de risco à saúde humana (IDE, THQ, ITP e FRC) para o público-alvo foram relativamente baixos (Tabelas 10 e 11). Este resultado deve-se à baixa ingestão diária de hortaliças por adultos da região Sudeste do Brasil, cerca de $77,0 \text{ g dia}^{-1}$ (IBGE, 2010a). Em outro contexto,

Yang et al. (2011) e Yaacob et al. (2018) observaram riscos devido ao consumo de outras brássicas como pakchoi (*B. chinensis*), repolho (*B. oleracea* var. *capitata*) e mostarda (*B. juncea*) provenientes de regiões contaminadas, mas tendo como base o consumo diário de hortaliças igual ou superior a 300 g dia⁻¹. Ou seja, o aumento do consumo de hortaliças e frutas visando atender às recomendações da Organização Mundial de Saúde, 400 g dia⁻¹, os índices de risco à saúde seriam preocupantes, especialmente para as crianças, independente do tratamento utilizado. As perspectivas mais críticas se dariam com o consumo de inflorescências provenientes de cultivo com utilização de dois resíduos, escória de siderurgia + cama de aviário compostada, independente de outras fontes de metais (ISLAM et al., 2014).

15. CONCLUSÕES

Apesar da escória de siderurgia conter metais tóxicos em sua composição, a translocação dos metais para as inflorescências é baixa e não representa risco de contaminação quando utilizada isoladamente. Entretanto, a sua aplicação associada à de cama de aviário fresca e, principalmente à cama de aviário compostada, favorece a absorção e a alta translocação de Pb para as inflorescências tornando-as inadequadas para o consumo infantil e adulto. Devido a essas interações complexas e potenciais, o uso de calcário na produção de brócolis apresenta-se como uma opção mais segura do que o uso de escória de siderurgia. Novos estudos precisam validar o uso seguro da escória na produção de hortaliças, principalmente em espécies da família *Brassicaceae*.

Os teores de Pb e de Cd nas inflorescências *in natura*, em todos os tratamentos, são superiores aos limites estabelecidos pela União Européia e Anvisa. O índice de ingestão diária destes metais (IDE) e o coeficiente de risco-alvo (THQ) foram, no geral, satisfatórios devido à baixa média de consumo de brócolis pela população brasileira.

O índice total de perigo (ITP), obtido pela soma de todos os metais, para crianças é elevado na maioria dos tratamentos, principalmente pela contribuição do Pb e Cd.

O uso de cama de aviário na produção de brócolis precisa ser racionalizado em função dos riscos de contaminação por metais. Devem ser incentivados estudos futuros envolvendo o fracionamento da matéria orgânica e a estrutura das cadeias de carbono presentes nas substâncias húmicas da cama de aviário e que estão relacionadas ao aumento da absorção e translocação de metais para o brócolis.

16. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A Região Serrana do Rio de Janeiro é um dos mais importantes polos nacionais de produção de hortaliças e é responsável pelo abastecimento de *Brassica* spp. para grande parte da região Sudeste do Brasil. A produção agrícola nesta região é realizada em condições edafoclimáticas singulares, apresenta elevada importância econômica e social e, de igual forma, possui muitos desafios a serem superados, conforme apresentado neste estudo.

Nesta região, a especialização dos produtores no cultivo de poucas espécies de hortaliças, com destaque para as brássicas, resulta em reduzida rotação com espécies não-hospedeiras de *P. brassicae*, o que muito contribui para a sobrevivência e a dispersão dos esporos de resistência do patógeno no solo. Este quadro resulta no aumento de perdas pela doença e consequente inviabilização de áreas para cultivo destas espécies ou apelo ao uso de produtos químicos para controle da doença. O uso de maquinários e implementos comunitários, sem sua limpeza prévia, e a erosão, com arraste de solo + esporos, são fatores que contribuem para a dispersão de inóculo do patógeno entre as áreas e propriedades. A não adoção de práticas de conservação do solo, associado ao relevo declivoso da região, favorecem o arraste de solo contaminado e a dispersão e o acúmulo de esporos de *P. brassicae* nos pontos mais baixos da paisagem.

Os solos ácidos da região são extremamente favoráveis à hémria das crucíferas. Identificou-se uma forte relação entre a intensidade da doença com a acidez e teores de alumínio no solo, agravados pelas falhas de manejo anteriormente mencionadas. Com isso, a realização de análise de fertilidade e a correção da acidez do solo devem ser encorajadas como medidas básicas para o manejo da cultura e redução das perdas pela doença. A calagem, além de reduzir a intensidade e danos causados pela hémria das crucíferas, também favorece a nutrição, o desenvolvimento e a produtividade das plantas.

O uso de mudas maiores e mais bem formadas, produzidas em bandejas com maior volume de células, e o pré-cultivo seguido de incorporação da biomassa de plantas não hospedeiras, como crotalária e coentro, também se mostraram eficientes em reduzir as perdas e assegurar maior produtividade, mesmo em condições climáticas extremamente favoráveis a doença e desfavoráveis à cultura.

A “cama” de aviário, principal fertilizante orgânico utilizado na região, tem sido aplicada de forma massiva, sem adoção de critérios técnicos. Neste estudo, o seu uso esteve associado ao aumento da hémria das crucíferas. Portanto, estas interações necessitam ser investigadas em ensaios futuros, sob condições controladas. A utilização deste resíduo orgânico também é merecedora de atenção por conter metais tóxicos que são aportados ao solo. O seu uso massivo, a longo prazo, associado aos solos ácidos da região, resulta em cenários preocupantes de contaminação de hortaliças por metais tóxicos.

Com relação à escória de siderurgia, embora tenha tido efeito positivo na correção da acidez do solo, similar ao calcário, o seu uso precisa ser regulamentado, especialmente quando combinado com a aplicação da cama de aviário. Para seu uso seguro em cultivos hortícolas, ainda são necessários estudos adicionais.

Para reversão deste quadro crítico de perdas pela hémria das crucíferas e contaminação por metais tóxicos, deverão ser desenvolvidas políticas públicas para melhor informação dos produtores e fomento a uma agricultura mais diversificada e sustentável. Dentre as práticas sugeridas estão maior diversificação e rotação das culturas com espécies não-hospedeiras; limpeza dos maquinários e implementos a cada uso; adoção de práticas conservacionistas visando reduzir os processos erosivos; realização da análise do solo e uso racional de fertilizantes orgânicos (cama de aviário) e minerais, e a correção da acidez do solo com aplicação de calcário e utilização de mudas maiores e de melhor qualidade.

17 REFERÊNCIAS

- ABICHEQUER, A.D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 21-26, 1998.
- ABPA – Associação Brasileira de Proteína Animal. Carne de frango resumo do setor. 2019. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/aves-e-suinos/2019/39deg-ro/2-abpa-mercados-brasilia-23-07-convertido.pdf> Acesso em: 30 Mar. 2020.
- ADAMI, P. F.; PELISSARI, A.; MORAES, A. D.; MODOLO, A. J.; ASSMANN, T. S.; FRANCHIN, M. F.; CASSOL, L. C. Grazing intensities and poultry litter fertilization levels on corn and black oat yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 3, p. 360-368, 2012.
- AGRISTAR. **Produtos**. 2020. Disponível em: < <https://agristar.com.br/topseed-premium/produtos> > Acesso em 01 de setembro de 2020.
- AGROFIT. Sistema de agrotóxicos fitossanitários do Ministério da Agricultura. 2020. Disponível em: <http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons>. Acesso em: 14 Jan. 2020.
- AHMED, H. U.; HWANG, S. F.; STRELKOV, S. E.; GOSSEN, B. D.; PENG, G.; HOWARD, R. J.; TURNBULL, G. D. Assessment of bait crops to reduce inoculum of clubroot (*Plasmodiophora brassicae*) of canola. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 91, n. 3, 545-551, 2011.
- AIST, J.R.; WILLIAMS, P. H. The cytology and kinetics of cabbage root hair penetration by *Plasmodiophora brassicae*. **Canadian Journal of Botany**, v. 49, n. 11, p. 2023-2034, 1971.
- ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. São Paulo: ANDA. 1992. 26p.
- ALLOWAY, B. J. **Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability**. Springer Science & Business Media. 613p. 2013.
- AMARAL SOBRINHO, M. N. B. Comissão IX- poluição dos solos e qualidade do ambiente: metais pesados em alguns fertilizantes e corretivos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, n. 16, p. 271, 1992.
- AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; BARRA, C. M.; LÃ, O. R. Química dos metais pesados no solo. **Química e mineralogia do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 249–312, 2009.
- ANTOINE, J. M.; FUNG, L. A. H.; GRANT, C. N. Assessment of the potential health risks associated with the aluminium, arsenic, cadmium and lead content in selected fruits and vegetables grown in Jamaica. **Toxicology reports**, v. 4, p. 181-187, 2017.
- ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Portaria nº 685, de 27 de agosto de 1998**. Diário Oficial da União. Seção 1. Brasília. 1998.
- ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução - RDC Nº 42, de 29 de agosto de 2013**. Diário Oficial da União. Seção 1. Brasília. Nº 168, sexta-feira, 30 de agosto de 2013.
- ARAÚJO, E. D. S.; GUERRA, J. G. M.; ESPINDOLA, J. A. A.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; MARTELLETO, L. A. P.; ALVES, B. J. R. Recuperação no sistema solo-planta de

nitrogênio derivado da adubação verde aplicada à cultura do repolho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 7, p. 729-735, 2011.

ARCHIBALD, J. M.; KEELING, P.J. Actin and ubiquitin protein sequences support a cercozoan/foraminiferan ancestry for the plasmodiophorid plant pathogens. **Journal of Eukaryotic Microbiology**, v. 51, n. 1, p. 113-118, 2004.

ASSIS, R. L.; AQUINO, A. M. The participatory construction of agro-ecological knowledge as a soil conservation strategy in the mountain region of Rio de Janeiro State (Brazil). **Open Agriculture**, v. 3, n. 1, p. 17-24, 2018.

AYERS, G. W. Studies on the life history of the club root organism, *Plasmodiophora brassicae*. **Canadian Journal of Research**, v. 22, n. 4, p. 143-149, 1944.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2. ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 1995. 414 p.

BEJO. **Couve-chinesa Suzuko**. 2020. Disponível em: < <https://www.bejo.com.br/couve-chinesa/suzuko-conventional> > Acesso em 01 de setembro de 2020.

BERNAL, M. P.; ALBURQUERQUE, J. A.; MORAL, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 22, p. 5444-5453, 2009.

BHERING, A.S. **Hérnia das crucíferas (*Plasmodiophora brassicae*) em couve-flor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) e suas relações com o manejo do solo no município de Nova Friburgo, RJ**. 146f. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2017.

BHERING, A. S.; CARMO, M. G. F.; MATOS, T. S.; LIMA, E. S. A.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. A. Soil factors related to the severity of Clubroot in Rio de Janeiro, Brazil. **Plant Disease**, v. 11, n.8, p.1345-1353, 2017.

BHERING, A. S., CARMO, M. G. F., COELHO, I. S., LIMA, E. S. A., DE CARVALHO, C. F., SARAIVA, A. L. R. F., PASSOS, S. R.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Soil management in a mountain agroecosystem and clubroot disease. **Plant Pathology**, v. 69, n. 2, 302-309, 2020.

BINI, C.; SARTORI, G.; WAHSHA, M.; FONTANA, S. Background levels of trace elements and soil geochemistry at regional level in NE Italy. **Journal of Geochemical Exploration**, v.109, p.125–133, 2011.

BOLAN, N. S.; SZOGI, A. A.; CHUASAVATHI, T.; SESHADRI, B.; ROTHROCK, M. J.; PANNEERSELVAM, P. Uses and management of poultry litter. **World's Poultry Science Journal**, v. 66, n. 4, p. 673-698, 2010.

BOLAN, N.; KUNHIKRISHNAN, A.; THANGARAJAN, R.; KUMPIENE, J.; PARK, J.; MAKINO, T.; KIRKHAM, M.B.; SCHECKEL, K. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils – To mobilize or to immobilize?. **Journal of Hazardous Materials**, v. 266, p. 141-166, 2014.

BONANOMI, G.; LORITO, M.; VINALE, F.; WOO, S. L. Organic amendments, beneficial microbes, and soil microbiota: toward a unified framework for disease suppression. **Annual Review of Phytopathology**, v. 56, p. 1-20, 2018.

BOSE, S.; BHATTACHARYYA, A.K. Heavy metal accumulation in wheat plant grown in soil amended with industrial sludge. **Chemosphere**, v. 70, p. 1264–1272, 2008.

- BOTERO, A.; GARCÍA, C.; GOSSEN, B. D.; STRELKOV, S. E.; 1, TODD, C. D.; BONHAMSMITH, P. C.; PÉREZ-LÓPEZ, E. Clubroot disease in Latin America: distribution and management strategies. **Plant Pathology**, v. 68, n. 5, p. 827-833, 2019.
- BURKI, F.; KUDRYAVTSEV, A.; MATZ, M.V.; AGLYAMOVA, G.V.; BULMAN, S.; FIER, M.; KEELING, P.J.; PAWLOWSKI, J. Evolution of *Rhizaria*: new insights from phylogenomic analysis of uncultivated protists. **Bmc. Evol. Biol.**, v. 10, p. 377, 2010.
- CAFÉ FILHO, A.C.; REIFSCHNEIDER, F. J. B. Ocorrência de *Plasmodiophora brassicae* no Distrito Federal. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.4, n.1, p.37-38, 1986.
- CAI, K; GAO, D.; CHEN, J; LUO, S. Probing the mechanisms of silicon-mediated pathogen resistance. **Plant Signaling & Behavior**, v. 4, n. 1, p. 1-3, 2009.
- CAMPOS, D.V.B.; FREIRE, L.R.; ZONTA, E.; EIRA, P.A.; DUQUE, F.F., DE-POLLI, H.; SOUTO, S.M.; SANTOS, G.A.; ANJOS, L.H.C.A. Adubos e corretivos. In: FREIRE, L.R. (Org.). **Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro**. Seropédica, RJ: Editora Universidade Rural, 2013. p. 107-128.
- CANELLA, D. S.; LOUZADA, M. L. D. C.; CLARO, R. M.; COSTA, J. C.; BANDONI, D. H.; LEVY, R. B.; MARTINS, A. P. B. Consumo de hortaliças e sua relação com os alimentos ultraprocessados no Brasil. **Revista de Saúde Pública**, v. 52, n. 50, 1-11, 2018.
- CARVALHO, E. S. **Avaliação participativa da qualidade do solo e sanidade dos cultivos para o manejo integrado da hérnia das crucíferas em ambiente de montanha**. 97f. Tese (Doutorado em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária). Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2016.
- CASTILLO, J. A.; GUERRERO, O. Efecto de controladores biológicos sobre la hernia de las crucíferas en Tabio, Cundinamarca. **Inventum**, v. 3, n. 5, p. 30-40, 2008.
- CAO, L. et al. Health risk assessment of trace elements exposure through the soil-plant (maize)-human contamination pathway near a petrochemical industry complex, Northeast China. **Environmental Pollution**, p. 114414, 2020.
- CARRIJO, I. V.; RÊGO, A. M. Doenças das brássicas. In: ZAMBOLIM, L.; VALE, F. X. R.; COSTA, H. (Ed.). **Controle de doenças de plantas hortaliças**. Viçosa, MG: UFV, 2000. p. 335- 371.
- CASTRO, C. M.; DEVIDE, A. C. P. Plantas de cobertura e manejo de aléias no plantio direto de brócolis. **Revista Cultura Agrônômica**, v. 27, n. 4, p. 471, 2018.
- CHEAH, L. H.; PAGE, B. B. C. *Trichoderma* spp. for potential biocontrol of clubroot of vegetable brassicas. In: **PROCEEDINGS OF THE NEW ZEALAND PLANT PROTECTION CONFERENCE. NEW ZEALAND PLANT PROTECTION SOCIETY INC**, 1997. p. 150-153.
- CHEAH, L. H.; VEERAKONE, S.; KENT, G. Biological control of clubroot on cauliflower with *Trichoderma* and *Streptomyces* spp. In: **PROCEEDINGS OF THE NEW ZEALAND PLANT PROTECTION CONFERENCE**. New Zealand Plant Protection Society; 1998, 2000. p. 18-21.
- CHEN, S.; ZHOU, X.; YU, H. et al. Root exudates of potato onion are involved in the suppression of clubroot in a Chinese cabbage-potato onion-Chinese cabbage crop rotation. **Eur J Plant Pathol**, v. 150, 765-777, 2018.
- CRÊTE, R. **Worldwide importance of clubroot**. Clubroot Newslett N°. 11, 1981, p 6-7.

- CLUNE, T. S.; COPELAND, L. Effects of aluminium on canola roots. **Plant and soil**, v. 216, n. 1, p. 27-33, 1999.
- COLOMBARI, L. F.; BALDINI, L. F. G.; SILVA, F. Z. D.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D.; GOTO, R. Controle químico da hérnia das crucíferas em rúcula cultivada em campo naturalmente infestado. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 4, p. 231-240, 2018.
- CONAMA - CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA n. 420, de 28 de janeiro de 2009. Brasília, 16 p. 2009.
- CONDÉ, V. F.; OLIVEIRA, D. M.; OLIVEIRA, J. E. Z. Incidência e severidade de hérnia das crucíferas (*Plasmodiophora brassicae* W.) em repolho (*Brassica oleracea* var. *capitata*) em solo tratado com biofertilizante tipo bokashi. **Ciência e Natura**, v. 39, n. 1, p. 7, 2017.
- CORDEIRO, A. A. S.; RODRIGUES, M. B.; GONÇALVES JÚNIOR, M.; ESPÍNDOLA, J. A. A.; ARAÚJO, E. S.; GUERRA, J. G. M. Organic cabbage growth using green manure in pre-cultivation and organic top dressing fertilization. **Horticultura Brasileira**, v. 36, p. 515-520, 2018.
- CORRÊA, A. L.; DE SOUZA ABBOUD, A. C.; GUERRA, J. G. M.; DE AGUIAR, L. A.; RIBEIRO, R. D. L. D. Adubação verde com crotalária consorciada ao minimilho antecedendo a couve-folha sob manejo orgânico. **Ceres**, v. 61, n. 6, 956-963, 2014.
- COUTO, R. R.; COMIN, J. J.; SOUZA, M.; RICACHENEVSKY, F. K.; LANA, M. A.; GATIBONI, L.; CERETTA, C. A.; BRUNETTO, G. Should heavy metals be monitored in foods derived from soils fertilized with animal waste?. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 732, 2018a.
- COUTO, R. R.; FAVERSANI, J.; CERETTA, C. A.; FERREIRA, P. A. A.; MARCHEZAN, C.; FACCO, D. B.; GARLET, L. P.; SILVA, J. S.; COMIN, J. J.; BIZZI, C. A.; FLORES, E. M. M.; BRUNETTO, G. Health risk assessment and soil and plant heavy metal and bromine contents in field plots after ten years of organic and mineral fertilization. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 153, p. 142-150, 2018b.
- CUNHA, K.P.V. da; NASCIMENTO, C.W.A. do; SILVA, A.J. da. Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc for maize (*Zea mays* L.) grown on a contaminated soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.171, p.849-853, 2008.
- DIEDERICHSEN, E.; DIXON, G.R.; WALLENHAMMAR, A.C; FERNANDO, D.; BALESSENT, M.H. Special issue on clubroot and blackleg diseases of brassicas – Foreword. **Eur. J. Plant. Pathol.**, v. 145, p. 515–516, 2016.
- DIXON, G. R. The occurrence and economic impact of *Plasmodiophora brassicae* and clubroot disease. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 28, n. 3, p. 194-202, 2009a.
- DIXON, G. R. *Plasmodiophora brassicae* in its environment. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 28, n. 3, p. 212-228, 2009b.
- DIXON, G.R. Clubroot (*Plasmodiophora brassicae* Woronin) – an agricultural and biological challenge worldwide. **Canadian Journal of Plant Pathology**, v. 36, p. 5-18, 2014.
- DIXON, G. R.; PAGE, L. V. Calcium and nitrogen eliciting alterations to growth and reproduction of *Plasmodiophora brassicae* (clubroot). **Acta Horticulture**, v. 459, p. 343-349, 1998.
- DIXON, G.R.; TILSTON, E.L. Soil-borne pathogens and their interactions with the soil environment. In: DIXON, G.R.; TILSTON, E.L., editors. **Soil Microbiology and Sustainable Crop Production**. Dordrecht, Netherlands: Springer; p. 197–271, 2010.

DONAGEMMA, G. K.; DE CAMPOS, D. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. M. **Manual de métodos de análises de solos**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.

DONALD, C.; PORTER, I. Integrated control of clubroot. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 28, n. 3, p. 289-303, 2009.

DYER, C.A. Heavy metals as endocrine disrupting chemicals. In: GORE, A.C. (Ed.). **Endocrine-Disrupting Chemicals: From Basic Research to Clinical Practice**. Humana Press, Totowa, pp. 111–133, 2007.

ECHART, C. L.; CAVALLI-MOLINA, S. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Ciência Rural**, v. 31, n. 3, p. 531-541, 2001.

EMATER-RJ. **Relatório por culturas do sistema ASPA/AGROGEO – Ano 2019**. Disponível em: <http://www.emater.rj.gov.br/images/cul2019.htm> Acesso em 12 de janeiro de 2020.

FACCHINELLI, A.; SACCHI, E.; MALLÉN, L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. **Environ. Pollut.**, v. 114, p. 313–24, 2001.

FAN, Y.; LI, Y.; LI, H.; CHENG, F. Evaluating heavy metal accumulation and potential risks in soil-plant systems applied with magnesium slag-based fertilizer. **Chemosphere**, v. 197, 382-388, 2018.

FAOSTAT – Food and Agriculture Organization. **Cultivos**. 2019. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>> Acesso em 16 de fevereiro de 2020.

FELTRIN. **Hortalças**. 2020. Disponível em: <<https://www.sementesfeltrin.com.br/Produto/Linha/hortalicas/frutos>> Acesso em 01 de setembro de 2020.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n.6, p.1039-1042, 2011.

FILGUEIRA, F.A.R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortalças**. Viçosa: UFV, 3ed., 2008. 421p.

FINSTEIN, M.S.; MILLER, F.C. Principles of composting leading to maximization of decomposition rate, odor control, and cost effectiveness. In: GASSER, J. K. R. (Ed.), **Composting of Agricultural and Other Wastes**. Elsevier Applied Science Publications, Barking, Essex, 1985. p. 13–26.

FRANCO, T. F.; LIMA, E. S. A.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; CARMO, M. G. F.; BREDA, F. A. F. Enrichment and bioavailability of toxic elements in intensive vegetable production areas. **Caatinga**, v. 33, n. 1, p. 124 – 134, 2020.

FREIRE, L. R.; BALIEIRO, F. C.; ZONTA, E.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; LIMA, E.; GUERRA, J. G. M.; FERREIRA, M. B. C.; LEAL, M. A. A.; CAMPOS, D. V. B.; POLIDORO, J. C. **Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro**. Seropédica, RJ: Editora Universidade Rural, 2013.

FRIBERG, H.; LAGERLOF, J.; RAMERT, B. Usefulness of nonhost plants in managing *Plasmodiophora brassicae*. **Plant Pathology**, v. 55, p. 690–695, 2006.

GALL, J.E.; BOYD, R.S.; RAJAKARUNA, N. Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: a review. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, p 201, 2015.

- GAO, Y.; XU, G. Development of an Effective Nonchemical Method against *Plasmodiophora brassicae* on Chinese Cabbage. **International Journal of Agronomy**, 1-5, 2014.
- GARBER, R. C.; AIST, J. R. The ultrastructure of mitosis in *Plasmodiophora brassicae* (*Plasmodiophorales*). **Journal of cell science**, v. 40, n. 1, p. 89-110, 1979a.
- GARBER, R. C.; AIST, J. R. The ultrastructure of meiosis in *Plasmodiophora brassicae* (*Plasmodiophorales*). **Canadian Journal of Botany**, v. 57, n. 22, p. 2509-2518, 1979b.
- GAMLIEL, A.; STAPLETON, J.J. Effect of chicken compost or ammonium phosphate and solarization on pathogen control, rhizosphere microorganisms, and lettuce growth. **Plant Disease**, v. 77, p. 886-891, 1993a.
- GAMLIEL, A.; STAPLETON, J.J. Characterization of antifungal volatile compounds evolved from solarized soil amended with cabbage residues. **Phytopathology**, v. 83, p. 899-905, 1993b.
- GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; HUBNER, A.P.; LUNKES, A.; GUIDINI, F.; AMARAL, E. B. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 1097-1104, 2003.
- GISBERT, C.; CLEMENTE, R.; NAVARRO-AVINÓ, J. et al. Tolerance and accumulation of heavy metals by Brassicaceae species grown in contaminated soils from Mediterranean regions of Spain. **Environmental and Experimental Botany**, v. 56, n.1, 19-27, 2006.
- GOSSSEN, B.D.; DEORA, A.; PENG, G.; HWANG, S.F.; MCDONALD, M. R. Effect of environmental parameters on clubroot development and the risk of pathogen spread. **Canadian Journal of Plant Pathology**, v. 36, sup1, p. 37-48, 2014.
- GOSSSEN, B.D.; STRELKOV, S.E.; MANOLII, V.P. et al. Spread of *Plasmodiophora brassicae* on canola in Canada, 2003–2014: old pathogen, new home. **Canadian Journal of Plant Pathology**, v. 37, 403–13, 2015.
- GOSSSEN, B. D.; KASINATHAN, H.; DEORA, A.; PENG, G.; MCDONALD, M. R. Effect of soil type, organic matter content, bulk density and saturation on clubroot severity and biofungicide efficacy. **Plant Pathology**, v. 65, p. 1238–1245, 2016.
- GRISEL, P. N.; ASSIS, R. L. Adoção de práticas agrícolas sustentáveis: Estudo de caso de um sistema de produção hortícola familiar em ambiente de montanha. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 29, n. 1, p. 133-158, 2012.
- GRISEL, P.N. & ASSIS, R.N. **Dinâmica agrária da Região Sudoeste do município de Nova Friburgo e os atuais desafios de sua produção hortícola familiar**. Documentos nº 299, Embrapa Agrobiologia, Seropédica, 2015.
- GUERRA, J.G.M.; LEAL, M.A.A., FERREIRA, M.B.C. Recomendações de adubos, corretivos e de manejo da matéria orgânica para as principais culturas do Estado do Rio de Janeiro: Brócolos, couve, couve-flor e repolho. In: FREIRE, L.R. (Org.). **Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro**. Seropédica, RJ: Editora Universidade Rural, 2013. p.107-128.
- GUO, R.; LI, G.; JIANG, T.; SCHUCHARDT, F.; CHEN, T.; ZHAO, Y.; SHEN, Y. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. **Bioresource Technology**, v. 112, p. 171-178, 2012

HADAR, Y.; PAPADOPOULOU, K.K. Suppressive composts: microbial ecology links between abiotic environments and healthy plants. **Annual Review of Phytopathology**, v.50, n.1, p.133–153, 2012.

HASSE, I; MIO, L. L. M.; LIMA NETO, V. C. Efeito do pré-plantio com plantas medicinais e aromáticas no controle de *Plasmodiophora brassicae*. **Summa phytopathologica**, v. 33, n. 1, 74-79, 2007.

HAYNES, R. J.; MOKOLOBATE, M. S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 59, p. 47–63, 2001.

HE, Z. L.; YANG, X. E.; STOFFELLA, P. J. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. **Journal of Trace elements in Medicine and Biology**, v. 19, n. 2-3, p. 125-140, 2005.

HE, P.; CUI, W.; MUNIR, S.; HE, P.; LI, X.; WU, Y.; YANG, X.; TANG, P.; HE, Y. *Plasmodiophora brassicae* root hair interaction and control by *Bacillus subtilis* XF-1 in Chinese cabbage. **Biological Control**, v. 128, p. 56-63, 2019.

HIRAI, M. Genetic analysis of clubroot resistance in *Brassica* crops. **Breeding Science**, v. 56, n. 3, p. 223-229, 2006.

HOWARD, R. J.; GARLAND, J. A.; SEAMAN, W. L. **Diseases and pests of vegetable crops in Canadá**. Ottawa: CPS e ESC, 1994. 554 p.

HWANG, S. F. et al. Seedling age and inoculum density affect clubroot severity and seed yield in canola. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 91, n. 1, p. 183-190, 2011.

HWANG S. F; STRELKOV, S.E.; FENG, J.; GOSSEN, B.D.; HOWARD, R.J. *Plasmodiophora brassicae*: a review of an emerging pathogen of the Canadian canola (*Brassica napus*) crop. **Molecular Plant Pathology**, v. 13, p. 105–13, 2012a.

HWANG, S. F. et al. Effects of fungicide, seeding date and seedling age on clubroot severity, seedling emergence and yield of canola. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 92, n. 6, p. 1175-1186, 2012b.

HWANG, S. F.; HOWARD, R. J.; STRELKOV, S. E.; GOSSEN, B. D.; PENG, G. Management of clubroot (*Plasmodiophora brassicae*) on canola (*Brassica napus*) in western Canada. **Canadian Journal of Plant Pathology**, v. 36, p. 49-65, 2014.

HWANG, S. F.; AHMED, H. U.; ZHOU, Q.; TURNBULL, G. D.; STRELKOV, S. E.; GOSSEN, B. D.; PENG, G. Effect of host and non-host crops on *Plasmodiophora brassicae* resting spore concentrations and clubroot of canola. **Plant Pathology**, v. 64, p. 1198–1206, 2015.

HORTICERES. **Couve-chinesa híbrida Eikoo**. 2020. Disponível em: <<https://www.horticteres.com.br/produtos/brassicas/couve-chinesa/couve-chinesa-hibrida-eikoo/>> Acesso em 01 de setembro de 2020.

IANNOTTI, D. A.; PANG, T.; TOTH, B. L.; ELWELL, D. L.; KEENER, H. M.; HOITINK, H. A. J. A quantitative respirometric method for monitoring compost stability. **Compost Sci. Util.**, v. 1, p. 52–65, 1993.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa de Orçamentos Familiares 2008-2009**: Aquisição alimentar domiciliar *per capita* - Brasil e Grandes Regiões. Rio de Janeiro, 2010a. 282 p. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 15 fev. 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico 2010**. Rio de Janeiro, 2010b. Disponível em: <www.censo2010.ibge.gov.br>. Acesso: 22 abr. 2020.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário**. 2017. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6953#>> Acesso em 26 de junho de 2020.

INGRAM, D. S.; TOMMERUP, I.C. The life history of *Plasmodiophora brassicae* Woron. **Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, v. 180, n. 1058, p. 103-112, 1972.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações automáticas**. 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>> Acesso em 25 de dezembro de 2018.

IROKAWA, F.M.; ZAMBOLIM, L.; PARREIRA, D.F. Interaction between a biostimulant and cyazofamid in the control of clubroot of crucifers under conditions of high disease density. **Summa Phytopathologica**, v. 46, n.1, p. 46-48, 2020.

ISLAM, M. S.; AHMED, M. K.; HABIBULLAH-AL-MAMUN, M.; MASUNAGA, S. Trace metals in soil and vegetables and associated health risk assessment. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 186, n. 12, 8727-8739, 2014.

ITO, S.; YANAGI, C.; TANAKA, S.; KAMEYA-IWAKI, M.; KISHI, F. Identification of an in plant-induced mRNA of *Plasmodiophora brassicae*. **Journal of Phytopathology**, v. 147, n. 2, p. 79-82, 1999.

JAVED, M.; USMANI, N. Accumulation of heavy metals and human health risk assessment via the consumption of freshwater fish *Mastacembelus armatus* inhabiting, thermal power plant effluent loaded canal. **SpringerPlus**, v. 5, n. 1, 1-8, 2016.

JI, K.; KIM, J.; LEE, M.; et al. Assessment of exposure to heavy metals and health risks among residents near abandoned metal mines in Goseong, Korea. **Environmental Pollution**, v. 178, 322-328, 2013.

JING, W; YUN, H; XIAOLING, H; YINGZE, N; XIAOLAN, L; YONG, L. Study of symptoms, yield loss of clubroot and modality of *Plasmodiophora brassicae* in rape. **Chin. J. Oil Seed Sci.**, v. 30, n. 1, p.112–115, 2008.

JUAREZ, M. F.; PRAHAUSER, B.; WALTER, A.; INSAM, H.; FRANKE-WHITTLE, I. H. Cocomposting of biowaste and wood ash, influence on a microbially driven-process. **Waste Manage**, v. 46, p. 155-164, 2015.

KABATA-PENDIAS, A.; ADRIANO, D. C. Trace metals. **Soil amendments and environmental quality**. Boca Raton: Lewis, p. 139–167, 1995.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2011. 505p.

KAGEYAMA, K. & ASANO, T. L. Life cycle of *Plasmodiophora brassicae*. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 28, n. 3, p. 203-211, 2009.

KHAN, S.; CAO, Q.; ZHENG, Y. M.; HUANG, Y. Z.; ZHU, Y. G. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. **Environmental Pollution**, v. 152, n. 3, 686-692, 2008.

- KHAN, M. U.; MALIK, R. N.; MUHAMMAD, S. Human health risk from heavy metal via food crops consumption with wastewater irrigation practices in Pakistan. **Chemosphere**, v. 93, n. 10, p. 2230-2238, 2013.
- KORENTAJER, L. A review of the agricultural use of sewage sludge: benefits and potential hazards. **Water S.A.**, v.17, n. 3, p. 189-196, 1991.
- KOWATA-DRESCH, L. S.; MAY-DE MIO, L. L. Clubroot management of highly infested soils. **Crop Protection**, v. 35, p. 47-52, 2012.
- KPOMBLEKOU-A, K.; MORTLEY, D. Organic Fertilizers in Alabama: Composition, Transformations, and Crop Response in Selected Soils of the Southeast United States. **Organic Fertilizers**, 25. 2016.
- KUMAR, A.; CHOUDHAR, A. K.; RAHI, S. Scientific cultivation of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*). In: CHOUDHARY, A. K.; RANA, K. S.; DASS, A.; SRIVASTAV, M. **Advances in vegetable agronomy**. New Delhi: IARI, 2014, pp. 87-91.
- LAHLALI, R.; PENG, G.; GOSSEN, B. D.; MCGREGOR, L.; YU, F.Q.; HYNES, R. K.; HWANG, S.F.; MCDONALDD, M.R.; BOYETCHKO, S.M. Evidence that the biofungicide Serenade (*Bacillus subtilis*) suppresses clubroot on canola via antibiosis and induced host resistance. **Phytopathology**, v. 103, n. 3, p. 245-254, 2013.
- LAZAROVITS, G. Management of soilborne plant pathogens with organic soil amendments: a disease control strategy salvaged from the past. **Canadian Journal of Plant Pathology**, v. 23, p. 1-7, 2001.
- LEAL, M. A. D. A.; GUERRA, J. G. M.; PEIXOTO, R. T. D. G.; ALMEIDA, D. L. D. Desempenho de crotalaria cultivada em diferentes épocas de semeadura e de corte. **Revista Ceres**, v. 59, n. 3, 386-391, 2012.
- LIMA, M. P.; CAFÉ-FILHO, A.C.; NOGUEIRA, N.L.; ROSSI, M.L.; SCHUTA, L.R. First report of clubroot of *Eruca sativa* caused by *Plasmodiophora brassicae* in Brazil. **Plant disease**, St. Paul, v. 88, p.573, 2004.
- LIMA, J. O. **Tempo de compostagem de cama de aves e seus efeitos no desenvolvimento de plantas de couve-flor e severidade da hérnia das crucíferas**. 60f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2019.
- LIMA, E. S. A.; MATOS, T. S.; PINHEIRO, H. S. K.; GUIMARÃES, L. D. D.; PÉREZ, D. V.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Soil heavy metal content on the hillslope region of Rio de Janeiro, Brazil: reference values. **Environmental monitoring and assessment**, v. 190, n. 6, 364, 2018.
- LORENZI, H. **Manual de identificação e controle de plantas daninhas: Plantio Direto e Convencional**. 7ª edição, Nova Odessa-SP, Instituto Plantarum, 2014.
- LOURENÇO JR, V. et al. **Rotação e Sucessão de Culturas em Hortaliças Cultivadas em Pequenas Áreas no Manejo de Doenças**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2016, 10p. (Circular Técnica 152).
- MACFARLANE, I. Factors affecting the survival of *Plasmodiophora brassicae* Wor. in the soil and its assessment by a host test. **Annals of Applied Biology**, v. 39, n. 2, p. 239-256, 1952.
- MACHADO, S. S.; BUENO, P. R. M.; DE OLIVEIRA, M. B.; DE MOURA, C. J. Concentração de chumbo em alface cultivada com diferentes adubos orgânicos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, n. 1, 63-70, 2008.

MALAVOLTA, E. **Fertilizantes e seu impacto ambiental: micronutrientes e elementos-traço: mitos, mistificação e fatos**. São Paulo: Petroquímica, 153p. 1994.

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

MARINGONI, A. C. Doenças das crucíferas: brócolis, couve, couve chinesa, rabanete, repolho e rúcula. In: KIMATI, H.; AMORIN, L.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A.; REZENDE, J. A. M. **Manual de fitopatologia: volume 2: doenças das plantas cultivadas**. São Paulo: Ceres, 1997. p. 315-324.

MATOS, T. S. **Fatores de transferência de elementos-traço do solo para plantas de couve-flor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) no município de Nova Friburgo-RJ**. 136f. Tese (Doutorado em Agronomia). Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2016.

MATTEY, M.; DIXON, G. R. Premature germination of resting spores as a means of protecting brassica crops from *Plasmodiophora brassicae* Wor. (clubroot). **Crop Protection**, v. 77, p. 27-30, 2015.

MAY, A.; TIVELLI, S.; VARGAS, P.; SAMRA, A.G.; SACCONI, L.V.; PINHEIRO, M.Q. **A cultura da couve-flor**. Campinas: Instituto Agronômico, (Boletim Técnico), n. 200, 2007, 36p. Disponível em:
<http://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/publicacoes_online/pdf/Tecnico200.pdf> Acesso em 17 de agosto de 2018.

MEGHVANSI, M. K.; VARMA, A. (Eds.). **Organic amendments and soil suppressiveness in plant disease management** (Vol. 46). Dordrecht: Springer, 2015.

MELO, R. A. C. (Ed). **A cultura dos brócolis**. Brasília, DF: Embrapa, 2015.153 p.

MELO, R. A. C.; VENDRAME, L. P. C.; MADEIRA, N. R.; BLIND, A. D.; VILELA, N.J. Characterization of the brazilian vegetable brassicas production chain. **Horticultura Brasileira**, v. 37, p. 366-372, 2019.

MEURER, E. J.; ANGHINONI, I. A solução do solo. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 5.ed. Porto Alegre: Evangraf, 2012. p.87-113.

MILLIGAN, G. W.; & COOPER, M. C. An examination of procedures for determining the number of cluster in a data set. **Psychometrika**, v. 50, p. 159-179, 1985.

MITANI, S.; SUGIMOTO, K.; HAYASHI, H.; TAKII, Y.; OHSHIMA, T., MATSUO, N. Effects of cyazofamid against *Plasmodiophora brassicae* Woronin on Chinese cabbage. **Pest Management Science**, v. 59, n. 3, p. 287-293, 2003.

MOURATO, M. P.; MOREIRA, I. N.; LEITÃO, I.; PINTO, F. R.; SALES, J. R.; MARTINS, L. L. Effect of heavy metals in plants of the genus *Brassica*. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 16, n. 8, 17975-17998, 2015.

MUIRHEAD, K.; TODD, C. D.; WEI, Y.; BONHAM-SMITH, P.; PÉREZ-LÓPEZ, E. ClubrootTracker: A Resource to Plan a Clubroot-Free Farm. **Plant Health Progress**, v. 21, n. 3, p. 185-187, 2020.

MULEC, A. O.; MIHELIC, R.; WALOCHNIK, J.; BULC, T.G. Composting of the solid fraction of blackwater from a separation system with vacuum toilets- effects on the process and quality. **J. Clean. Prod**, v. 112, p. 4683-4690, 2016

- MURAKAMI, H.; TSUSHIMA, S., SHISHIDO, Y. Soil suppressiveness to clubroot disease of Chinese cabbage caused by *Plasmodiophora brassicae*. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 11, p. 1637-1642, 2000.
- MURAKAMI, K.; SHINODA, H.; MARUTA, R.; GOTO, I. Field experiment on use of converter furnace slag to control clubroot disease in Broccoli. **Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 75, n. 1, p. 53-58, 2004.
- NAIKI, T. Life cycle and control of *Plasmodiophora brassicae*, causing clubroot disease of cruciferous plants. **Soil Microorganisms**, v. 29, p. 23-37, 1987.
- NARISAWA, K.; SHIMURA, M.; USUKU, F.; FUJUHARA, S.; HASHIBA, T. Effects of pathogen density, soil moisture, and soil pH on biological control of clubroot in Chinese cabbage by *Heteroconium chaetospora*. **Plant disease**, v. 89, n. 3, p. 285-290, 2005.
- NING, D.; LIANG, Y.; LIU, Z.; XIAO, J.; DUAN, A. Impacts of steel-slag-based silicate fertilizer on soil acidity and silicon availability and metals-immobilization in a paddy soil. **PLoS One**, v. 11, n. 12, 2016.
- NIST - National Institute of Standards and Technology. Standard Reference Materials -SRM 2709 - San Joaquin Soil. Baseline Trace Element Concentrations. Certificate Issue Date: 18 July 2003.
- NIWA, R.; KUMEI, T.; NOMURA, Y.; YOSHIDA, S.; OSAKI, M.; EZAWA, T. Increase in soil pH due Ca-rich organic matter application causes suppression of the clubroot disease of crucifers. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 39, n.3, p. 778-785, 2007.
- NIWA, R.; NOMURA, Y.; OSAKI, M; EZAWA, T. Suppression of clubroot disease under neutral pH caused by inhibition of spore germination of *Plasmodiophora brassicae* in the rhizosphere. **Plant Pathology**, v. 57, p. 445-452, 2008.
- NOBILE, F. O. Uso Agrônômico da Escória de Siderurgia. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 11, n. 2, p. 108-128, 2009.
- NOBLE, R & COVENTRY, E. Suppression of soil-borne plant diseases with composts: A review. **Biocontrol Science and Technology**, v. 15, n. 1, p. 3-20, 2005.
- NOBLE, R. Risks and benefits of soil amendment with composts in relation to plant pathogens. **Australasian Plant Pathology**, v. 40, p. 57-67, 2011.
- NOLAN, K. R. Copper toxicity syndrome. **Journal of Orthomolecular Psychiatry**, v. 12, n. 4, p 270-282, 1983.
- OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E. Mobilidade de metais pesados em um Latossolo Amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 4, p. 807-812, 2001.
- OZA, E. F.; MONACO, P. A. V. L.; DOS SANTOS, M. M.; ROSADO, T. L.; KRAUSE, M. R.; GARCIA, W. A. Aproveitamento de escória de siderurgia em substratos alternativos para produção de mudas de pimenteira Dedo-de-moça. **Revista Ceres**, v. 65, n. 1, p. 104-109, 2018.
- PACHURA, P.; OCIEPA-KUBICKA, A.; SKOWRON-GRABOWSKA, B. Assessment of the availability of heavy metals to plants based on the translocation index and the bioaccumulation factor. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 3, p.1469-1477, 2016.

- PARENTE, C. E. T. et al. Multi-temporal accumulation and risk assessment of available heavy metals in poultry litter fertilized soils from Rio de Janeiro upland region. **Environmental monitoring and assessment**, v. 191, n. 1, p. 28, 2019.
- PENALBER, A.T.T. **Controle alternativo da hérnia das crucíferas causada por *Plasmodiophora brassicae* em brócolis através de compostos orgânicos**. 168f. Tese (Doutorado em Fitopatologia). Brasília: Universidade de Brasília, 2009.
- PENG, G.; MCGREGOR, L.; LAHLALI, R.; GOSSSEN, B.D.; HWANG, S.F.; ADHIKARI, K.K.; STRELKOV, S.E.; McDONALD, M.R. Potential biological control of clubroot on canola and crucifer vegetable crops. **Plant Pathology**, v. 60, 566–574, 2011.
- PENG, G; PAGEAU, D.; STRELKOV, S.E.; GOSSSEN, B.D.; HWANG, S.F.; LAHLADI, R. A>2-year crop rotation reduces resting spores of *Plasmodiophora brassicae* in soil and the impact of clubroot on canola. **European Journal of Agronomy**, v. 70, p. 78–84, 2015
- PIAO, Z; RAMCHIARY, N.; LIM, Y.P. Genetics of clubroot resistance in *Brassica* species **Journal Plant of Growth Regulation**, v. 28, p. 252–264, 2009.
- POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; BOTELHO, D. M. S. Silicon in plant disease control. **Revista Ceres**, v. 62, n. 3, p. 323-331, 2015.
- PRADO, R. D. M.; COUTINHO, E. L. M.; ROQUE, C. G.; PEREZ VILLAR, M. L. Avaliação da escória de siderurgia e de calcários como corretivos da acidez do solo no cultivo da alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 4, p. 539-546, 2002.
- PREZOTTI, L. C.; MARTINS, A. G. Efeito da escória de siderurgia na química do solo e na absorção de nutrientes e metais pesados pela cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v. 59, n. 4, p. 530-536, 2012.
- RADULESCU, C.; STIHI, C.; POPESCU, I. V.; DULAMA, I. D.; CHELARESCU, E. D.; CHILIAN, A. Heavy metal accumulation and translocation in different parts of *Brassica oleracea* L. **Romanian Journal of Physics**, v. 58, p 1337-1354, 2013.
- RAHMAN, M. et al. Brassicaceae mustards: Traditional and agronomic uses in Australia and New Zealand. **Molecules**, v. 23, n. 1, 2018.
- RASHID, A.; AHMED, H. U.; XIAO, Q.; HWANG, S. F.; STRELKOV, S. E. Effects of root exudates and pH on *Plasmodiophora brassicae* resting spore germination and infection of canola (*Brassica napus* L.) root hairs. **Crop Protection**, v. 48, p. 16-23. 2013.
- RAVINDRAN, B.; MUPAMBWA, H. A.; SILWANA, S.; & MNKENI, P. N. Assessment of nutrient quality, heavy metals and phytotoxic properties of chicken manure on selected commercial vegetable crops. **Heliyon**, v. 3, n.12, e00493, 2017.
- REIS, A. Hérnia das crucíferas. Brasília: Embrapa Hortaliças, **Comunicado Técnico**, nº 72, 2009.
- RIBEIRO, J. C. **Metais pesados no solo e em hortaliças de folhas cultivadas no município de Nova Friburgo-RJ**. 123f. Tese (Doutorado em Agronomia). Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2019.
- ŘIČAŘOVÁ, V.; KACZMAREK, J.; STRELKOV, S.E. et al. Pathotypes of *Plasmodiophora brassicae* causing damage to oilseed rape in the Czech Republic and Poland. **Eur. J. Plant Pathol.**, v. 145, p. 559. 2016.
- ROCHERIEUX, J.; GLORY, P.; GIBOULOT, A.; BOURY, S.; BARBEYRON, G.; THOMAS, G.; MANZANARES-DAULEUX, M. J. Isolate-specific and broad-spectrum

QTLs are involved in the control of clubroot in *Brassica oleracea*. **Theoretical Applied Genetics**, v. 108, p. 1555-1563, 2004.

ROGERI, D. A.; ERNANI, P. R.; MANTOVANI, A.; LOURENÇO, K. S. Composition of poultry litter in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 40, 2016.

ROSA, D. D.; FIRMINO, A. C.; FURTADO, E. L. Comportamento de híbridos de couve chinesa à isolados de *Plasmodiophora brassicae*. **Summa phytopathologica**, v. 36, n. 4, p. 342-345, 2010.

RUARO, L.; LIMA NETO, V.C.; RIBEIRO JÚNIOR, P.J. Influência do boro, de fontes de nitrogênio e do pH do solo no controle de hérnia das crucíferas causada por *Plasmodiophora brassicae*. **Tropical Plant Pathology**, v. 34, n. 4, 231-238. 2009.

RUARO, L.; LIMA NETO, V.C.; MOTTA, A.C.V. Efeito do pH do solo em diferentes níveis de inóculo no controle de *Plasmodiophora brassicae*. **Summa Phytopathologica**, v.36, n.1, p.16-20, 2010.

SAKATA. **Brássicas**. 2020. Disponível em: < <https://www.sakata.com.br/hortalicas> > Acesso em 01 de setembro de 2020.

SAMEC, D.; URLIĆ, B.; SALOPEK-SONDI, B. Kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) as a superfood: Review of the scientific evidence behind the statement. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 59, n. 15, p. 2411-2422, 2019.

SANTOS, C.A.B. **Consórcios de espécies de cobertura de solo para adubação verde antecedendo ao cultivo de milho e repolho sob manejo orgânico**. 66p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Seropédica: Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2009.

SANTOS, C. A.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; COSTA, E. S. P.; DINIZ, C. S.; CARMO, M. G. F. Liming and biofungicide for the control of clubroot in cauliflower. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.47, p.303-311, 2017.

SANTOS, C. A.; DINIZ, C. S.; LIMA, J. O.; OLIVEIRA, L. S. S.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; CARMO, M. G. F. Avaliação preliminar do uso de torta de mamona no manejo da hérnia das crucíferas em couve-flor. **Colloquium Agrariae**, v. 14, n. 3, p. 31-38, 2018a.

SANTOS, C. A.; CARMO, M.G.F.; COSTA, E. S. P.; BHERING, A. S.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Teor e acúmulo de nutrientes em couve-flor Cv. Barcelona em função da aplicação de calcário e gesso agrícola. In: Zuffo, A.M.; Steiner, F.. (Org.). **Elementos da Natureza e Propriedades do Solo 5**. 1ed.Ponta Grossa-PR: Editora Atena, 2018b, v. 5, p. 190-198.

SANTOS, C. A.; BHERING, A. S.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; CARMO, M.G.F. Como prevenir a hérnia das crucíferas. **Cultivar HF**, Pelotas, v. 17, p. 12-14, 2019.

SANTOS, C. A.; CARMO, M. G. F.; BHERING, A. S.; COSTA, E. S. P.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Use of limestone and agricultural gypsum in cauliflower crop management and clubroot control in mountain farming. **Acta Scientiarum-Agronomy**, v. 42, e42494, 2020a.

SANTOS, C. A.; CARMO, M.G.F.; RIBEIRO, J. C. Brócolis: Dobra produção em duas décadas. **Anuário HF 2020**, Uberlândia-MG, p. 36 - 38, 02 mar., 2020b.

SANTOS, C. A.; RIBEIRO, J.C.; CARMO, M. G. F. Cresce o consumo de brócolis. **Revista Campo & Negócios HF**, Uberlândia-MG, p. 13-15, abril, 2020c.

SARAIVA, A. L. D. R.; BHERING, A. D. S.; DO CARMO, M. G.; ANDREOTE, F. D.; DIAS, A. C.; COELHO, I. D. S. Bacterial composition in brassica-cultivated soils with low and high severity of clubroot. **Journal of Phytopathology**, p. 1-7, 2020.

SCHULLER, A.; LUDWIG-MÜLLER, J. Histological methods to detect the clubroot pathogen *Plasmodiophora brassicae* during its complex life cycle. **Plant Pathology**, v. 65, n. 8, p. 1223-1237, 2016.

SCHWELM, A. et al. The *Plasmodiophora brassicae* genome reveals insights in its life cycle and ancestry of chitin synthases. **Scientific Reports**, v. 5, p. 1-12, 2015.

SHAHEEN, N.; AHMED, M. K.; ISLAM, M. S.; HABIBULLAH-AL-MAMUN, M.; TUKUN, A. B. ISLAM, S., RAHIM, A. T. M. Health risk assessment of trace elements via dietary intake of 'non-piscine protein source' foodstuffs (meat, milk and egg) in Bangladesh. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 8, 7794-7806, 2016.

SHAHID, M.; PINELLI, E.; DUMAT, C. Review of Pb availability and toxicity to plants in relation with metal speciation; role of synthetic and natural organic ligands. **Journal of Hazardous Materials**, v. 219-220, p. 1-12, 2012.

SILVA, V.V. **Efeito do pré-cultivo de adubos verdes na produção de orgânica de brócolos (*Brassica oleraceae* L. var. *italica*) em sistema de plantio direto**. 81p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2002.

SILVA, C. A. Uso de resíduos orgânicos na agricultura. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Porto Alegre: Metrópole, 2008, p. 595-624.

SILVA, E. E.; DE-POLLI, H.; GUERRA, J. G. M.; AGUIAR-MENEZES, E. L.; RESENDE, A. L. S.; OLIVEIRA, F. D.; RIBEIRO, R. L. D. Sucessão entre cultivos orgânicos de milho e couve consorciados com leguminosas em plantio direto. **Horticultura brasileira**, v. 29, n. 1, p. 57-62, 2011.

SILVA, J.A.M.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; GARCÍA, A.C.; PANDOLFO, C.M.; VEIGA, M. Mitigation of heavy metal contamination in soil via successive pig slurry application. **Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, v. 26, p. 675-690, 2017.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do solo. p. 205-274, 2007.

SOUSA, F. F. **Fatores de transferência de metais pesados do solo para plantas de tomate cultivadas na Região de Nova Friburgo**, RJ. 119f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2017.

SOUSA, F. F.; CARMO, M. G. F.; LIMA, E. S. A.; SOUZA, C. C. B.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Lead and cadmium transfer factors and the contamination of tomato fruits (*Solanum lycopersicum*) in a tropical mountain agroecosystem. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 105, 325-331, 2020.

SOUZA, C. C. B.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; LIMA, E. S. A.; LIMA, J. O.; CARMO, M. G. F.; GARCÍA, A. C. Relation between changes in organic matter structure of poultry litter and heavy metals solubility during composting. **Journal of Environmental Management**, v. 247, p. 291-298, 2019.

SPOSITO, G. The chemistry of soils, Second edition. New York. Oxford University Press, 329p. 2008.

STOFFELLA, P. J.; KAHN, B. A. **Compost utilization in horticultural cropping systems.** CRC press, 2001.

STRELKOV, S. E.; MANOLII, V. P.; CAO, T.; XUE, S.; HWANG, S. F. Pathotype classification of *Plasmodiophora brassicae* and its occurrence in *Brassica napus* in Alberta, Canada. **Journal of Phytopathology**, v. 155, p.706–712, 2007.

STRELKOV, S. E.; MANOLII, V. P.; CAO, T.; XUE, S.; HWANG, S. F. Pathotype classification of *Plasmodiophora brassicae* and its occurrence in *Brassica napus* in Alberta, Canada. **Journal of Phytopathology**, v. 155, p.706–712, 2007.

STRELKOV, S.E.; HWANG, S.F.; MANOLII, V.P.; CAO, T.; FEINDEL, D. Emergence of new virulence phenotypes of *Plasmodiophora brassicae* on canola (*Brassica napus*) in Alberta, Canada. **Eur. J. Plant Pathol.**, v. 145, p. 517–529, 2016.

STRELKOV, S. E.; HWANG, S. F.; MANOLII, V. P.; TURNBULL, G.; FREDUA-AGYEMAN, R.; HOLLMAN, K.; & KAUS, S. Characterization of clubroot (*Plasmodiophora brassicae*) from canola (*Brassica napus*) in the Peace Country of Alberta, Canada. **Canadian Journal of Plant Pathology**, 1-7, 2020.

TAGHIZADEH, M.; SOLGI, M.; KARIMI, M.; SANATI, M. H.; KHOSHBIN, S. Heavy metals effects on *Brassica oleracea* and elements accumulation by salicylic acid. **Archives of Hygiene Sciences**, v. 7, n. 1, p. 1-11, 2018.

TAN, K. H. **Environmental Soil Science.** CRC Press, 2009.

TAKAHASHI, H. et al. *Plasmodiophora brassicae* induced cell death and medium alkalisation in clubroot-resistant cultured roots of *Brassica rapa*. **J. Phytopathol.**, v. 154, n. 3, p.156–162, 2006.

TERMORSHUIZEN, A. J.; VAN RIJN, E.; VAN DER GAAG, D. J.; ALABOUVETTE, C.; CHEN, Y.; LAGERLOF, J. MALANDRAKIS A. A.; PAPLOMATAS, E. J., RAMERT, B.; RYCKEBOER, J.; STEINBERG, C.; ZMORA-NAHUM, S. Suppressiveness of 18 composts against 7 pathosystems: variability in pathogen response. **Soil Biol Biochem**, v.38, p. 2461–2477, 2006.

TILSTON, E. L.; PITT, D., GROENHOF, A. C. Composted recycled organic matter suppresses soil-borne diseases of field crops. **New Phytologist**, v. 154, p. 731–740, 2002.

TIMILA, R.D.; CORRELL, J.C.; DUWADI, V.R. Severe and widespread clubroot epidemics in Nepal. **Plant Disease**, v. 92, n. 2, p.317, 2008.

TRAKA, M. H. Health benefits of glucosinolates. In: **Advances in Botanical Research.** Academic Press, 2016. p. 247-279.

TRANI, P. E. et al. **Couve de folha:** do plantio à pós-colheita. Campinas: Instituto Agronômico, 2015. 36p.

UGRENOVIĆ, V. et al. Effect of Brassicaceae as cover crops. **Selekcija I Semearstvo**, v. 25, n. 2, p. 1-8, 2019.

UNIÃO EUROPEIA. **Teores máximos de certos contaminantes presentes nos gêneros alimentícios.** Regulamento (CE) nº 1881/2006 da comissão de 19 de dezembro de 2006.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. 1989. Risk assessment guidance for superfund, vol. I: human health evaluation manual. EPA/540/1–89/002. Office of

Emergency and Remedial Response, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

USEPA, United State Environmental Protection Agency: **USEPA 3050B, Method 3050B. Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils**, 1996. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>. Acesso em: 01 Jun. 2019.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. Method 3050. Acid digestion of sediments, sludges, and soils. 2008. Disponível em: < <http://www.epa.gov/waste/hazard/testmethods> > Acesso: 15 fev. 2018.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. Risk-based Concentration Table. 2010. Disponível em: < <http://www.epa.gov/waste/hazard/testmethods> > Acesso em: 7 Jan. 2020.

VAN GINNEKEN, L.; MEERS, E.; GUISSON, R.; RUTTENS, A.; ELST, K.; TACK, F. M.; VANGRONVELD, J.; DIELS, L.; DEJONGHE, W. Phytoremediation for heavy metal-contaminated soils combined with bioenergy production. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 15, n. 4, p. 227-236, 2007.

VIDAL, M. C. Métodos Tradicionais de Controle da Hérnia das Crucíferas. Brasília: Embrapa Hortaliças, **Documentos**, nº 135, 2012, 20 p.

VIDAL, A. A.; PRADO, R. M. Aplicação de escória siderúrgica calcário e ureia em latossolo cultivado com arroz. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, p. 264-272, 2011.

VIÉGAS, A. P.; TEIXEIRA, A. R. Alguns fungos do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 3, n. 8, p. 223-245, 1943.

VOORRIPS, R.E. *Plasmodiophora brassicae*: aspects of pathogenesis and resistance in *Brassica oleracea*. **Euphytica**, v. 83, p. 139, 1995.

WALLENHAMMAR, A. C. Prevalence of *Plasmodiophora brassicae* in a spring oilseed rape growing area in central Sweden and factors influencing soil infestation levels. **Plant Pathology**, v. 45, p. 710–719, 1996.

WALLENHAMMAR, A.C. Monitoring and control of *Plasmodiophora brassicae* in spring oil seed brassica crops. **Acta Universitatis Agriculturae Sueciae**, Agraria 183. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, p. 53, 1999.

WANG, J.; HUANG, Y.; LIN, S.; LIU, F.; SONG, Q.; PENG, Y.; ZHAO, L. A strain of *Streptomyces griseoruber* isolated from rhizospheric soil of Chinese cabbage as antagonist to *Plasmodiophora brassicae*. **Ann Microbiol**, v. 62, p. 247–253, 2012.

WEBB, P. C. Zoosporangia, believed to be those of *Plasmodiophora brassicae*, in the root hairs of non-cruciferous plants. **Nature**, v. 163, p. 608, 1949.

WEBSTER, M. A.; DIXON, G. R. Calcium, pH and inoculum concentration influencing colonization by *Plasmodiophora brassicae*. **Mycological Research**, v. 95, n. 1, p. 64-73, 1991a.

WEBSTER, M. A.; DIXON, G. R. Boron, pH and inoculum concentration influencing colonization by *Plasmodiophora brassicae*. **Mycological Research**, v. 95, n. 1, p. 74-79, 1991b.

YAACOB, A.; YAP, C. K.; NULIT, R.; OMAR, H.; AL-SHAMI, S. A.; BAKHTIARI, A. R. Assessment of health risks of the toxic Cd and Pb between leafy and fruit vegetables collected

from selected farming areas of Peninsular Malaysia. **Integrative Food, Nutrition and Metabolism**, v. 5, n. 3, p. 1-9, 2018.

YANG, Q. W.; XU, Y.; LIU, S. J.; HE, J. F.; LONG, F. Y. Concentration and potential health risk of heavy metals in market vegetables in Chongqing, China. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 74, n. 6, 1664-1669, 2011.

ZAMBOLIM, L.; VENTURA, J. A. Efeito do nitrogênio na interação com doenças de plantas. In: ZAMBOLIM, L.; VENTURA, J.A.; ZANÃO JÚNIOR, L. A. **Efeito da nutrição mineral no controle de doenças de plantas**. Viçosa: UFV, p. 47-80, 2012.

ZHU, F.; FAN, W.; WANG, X.; QU, L.; YAO, S. Health risk assessment of eight heavy metals in nine varieties of edible vegetable oils consumed in China. **Food and Chemical Toxicology**, v. 49, n. 12, p. 3081-3085, 2011.

ZUCCONI, F.; MONACO, A.; FORTE, M.; DE BERTOLDI, M. Phytotoxins during the stabilization of organic matter. In: GASSER, J. K. R. (Ed.). **Composting of Agricultural and Other Wastes**. Elsevier Applied Science Publishers, Barking, 1985. p. 73–85.

18 APÊNDICES

18.1 Apêndice A - Questionário para coleta de couve-comum na região Serrana Fluminense.

Código da propriedade: _____ Nº de amostras coletadas: _____

Data: _____

Identificação geral

1-Proprietário: Lote:	2-Tamanho da propriedade no geral:	3-Há quanto tempo cultiva couve nessa área?
4-Área plantada com couve: -	5-Qual o espaçamento? <i>Ou...</i>	6-Quantos pés de couve plantados na área?
7-Qual foi a data do transplântio da couve?	8-Quantas colheitas já foram feitas?	9- Qual será o próximo cultivo na área?
10- A cultura anterior nesta área era uma brássica? () Sim () Não. Qual cultura?:	11- <i>Caso a resposta seja não.</i> Qual foi a última brássica plantada na área?	12-Data do fim do último cultivo de brássica na área? 13- Fez pousio? () Sim () Não
14-Cultivou brássicas em áreas próximas a esta? () Sim () Não 15- Quando? 16-Qual brássica?	18-Material () mudas- clones () sementes <i>Caso não seja clone,</i> 19-Qual a cultivar?	21-Como é feita a irrigação? () Aspersão () gotejamento () Mangueira 22-Qual a origem da água?
17-Qual a origem das mudas do plantio atual? () Próprio () Viveiro	20-Qual o tipo de substrato? () comercial () preparo local () outros <i>Cite</i>	

Preparo do solo

23- Implementos usados () arado () grade () enxada rotativa () encanteirador () Outro <i>Cite:</i>	24-Origem dos implementos:() pessoal () comunitário 25-Faz a limpeza prévia dos implementos? () Sim () Não 26. Como foi esta limpeza? <i>Explique....</i>
--	---

Práticas de preparo e de conservação de solo

27-Qual a prática de plantio? () cultivo em morro abaixo () cultivo em diagonal () aração e gradagem em nível () cultivo mínimo () plantio direto	() terraços () faixas de retenção () cobertura do solo () aterro – quando () Outros. Explique...
---	---

Fertilidade do solo

28- Análise de solo () sim () não	29-Quando?
30-Faz calagem? () sim () não <i>Se sim,</i> baseado em que critério? _____	34-Como aplicou? () a lanço () na cova Explique.
31-Quando? <i>Ou</i> Com que frequência?	35-Tempo entre a aplicação e o transplântio:

32-Quanto: 33-Corretivo: () calcítico () dolomítico () cal virgem () hidratada () outro. <i>Cite:</i>	36-Outras considerações:
37-Usou fosfato de rocha () sim () não <i>Se sim</i> , 38-Quando:	39-Quanto: 40-Como aplicou?
41-Adubação verde: () sim () não <i>Se sim</i> , 43-Quando:	42-Qual espécie? Ou quais? 44-Como foi incorporado?

Cultivo da couve

<u>45-Adubação de plantio</u>		
Orgânicos (<i>ex: cama de ave curtida ou não curtida</i>)	Quantidade por cova (<i>se não souber, pesar</i>)	Procedência/empresa
Químicos (<i>se for fórmula, informa-la também</i>)	Quantidade por cova (<i>se não souber, pesar</i>)	Procedência/empresa

46-Adubação de cobertura (de rega)

Adubação orgânica	Quantidade por cova	Procedência/empresa	épocas
Adubos químicos	Quantidade por cova	Procedência/empresa	épocas

47-Adubação foliar

Adubo foliar (<i>ex: boro e Mo</i>)	Quantidade (concentração e volume de água)	Procedência/empresa	épocas

Controle do mato

48-Descrever as informações dos herbicidas por completo na lista de insumos (anexo)

<input type="checkbox"/> Uso de herbicida pré- plantio, Qual?: _____ <input type="checkbox"/> Uso de herbicida pós- plantio, Qual?: _____ <input type="checkbox"/> mulching			
<input type="checkbox"/> cultivador	Se usa	limpa o equipamento? <input type="checkbox"/> sim <input type="checkbox"/> não	Quando o utiliza?
<input type="checkbox"/> enxada	Se usa	limpa o equipamento? <input type="checkbox"/> sim <input type="checkbox"/> não	Quando o utiliza?
Caso limpe o equipamento, como é feito? <i>Cite:</i>			
<input type="checkbox"/> outros meios de controle, <i>cite:</i>			

Pragas

49- Quais são as principais pragas?
 Pulgão Cochonilha Lagarta da folha - curuquerê lagarta mede- palmo traça Lagarta rosca grilo outros. *Especifique:*

50-Produtos usados no controle de pragas
Descrever as informações dos inseticidas por completo na lista de insumos (anexo)

Doenças

51- Quais são as principais doenças?
 Hérnia (galha ou batata da couve) Míldio Podridão-negra Sclerotinia Podridão mole nematoides Outras: *Especificar:*

52-Intensidade da hérnia na visão do produtor:

53-Produtos usados no controle de doenças
Descrever as informações dos fungicidas e demais produtos na lista de insumos (anexo)

54- Realiza alguma prática específica para controlar a hérnia? Cite

55- Já usou algum produto químico para controle da hérnia)? sim não

56- Opinião sobre os resultados com esse produto?

Colheita e restos culturais

57-Início da colheita:	59-Previsão para as últimas colheitas
58-Quantas vezes já colheu?	
60-Colhe e embala no campo <input type="checkbox"/> sim <input type="checkbox"/> não	57-Intervalo de colheitas: Cite:
58-Forma de comercialização: <input type="checkbox"/> "Mói" <i>Se sim</i> Quantas folhas por unidade: <input type="checkbox"/> Outros, cite:	59-Destino das vendas: <input type="checkbox"/> venda direta <input type="checkbox"/> intermediário <input type="checkbox"/> Ceasa <input type="checkbox"/> outro: cite:
60-Destino dos restos culturais:	61-Destinos das raízes:

Assistência técnica	
62- Recebe assistência de algum órgão/empresa/loja? Cite-o.	

18.2 Apêndice B - Limite de detecção e de quantificação dos metais Cd, Cu, Fe, Mn, Pb e Zn

Apêndice B. Limite de detecção e de quantificação dos metais Cd, Cu, Fe, Mn, Pb e Zn.

Metais	Limite de Detecção mg L ⁻¹	Limite de quantificação Mg L ⁻¹
Pb	0,11933	0,23492
Cd	0,00957	0,01839
Cu	0,07844	0,15926
Fe	0,43502	0,71677
Mn	0,04047	0,03818
Zn	0,20851	0,28211

18.3 Apêndice C – Teores e estimativa de aporte de metais nos insumos.

Apêndice C. Teores (mg kg⁻¹) e estimativa de aporte de elementos (g ha⁻¹) a partir da aplicação dos corretivos calcário e escória de siderurgia, da adubação orgânica com cama de aviário fresca e compostada por 45 dias, e adubação mineral

Insumo	Quantidade (kg ha ⁻¹)*	Teores (mg kg ⁻¹)						Estimativa de aporte (g ha ⁻¹)					
		Pb	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn	Pb	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn
Corretivos													
Calcário	3.400,00	6,13	2,68	2,66	600,33	15,94	13,02	20,83	9,10	9,03	2041,11	54,21	44,26
Escória	3.500,00	14,79	2,31	13,88	25483,14	4562,13	10,40	51,75	8,09	48,58	89191,00	15967,46	36,41
Adubação orgânica													
Cama de aviário fresca	11.111,10	18,12	2,31	175,18	5427,60	203,72	157,28	201,28	25,68	1946,50	60306,60	2263,59	1747,52
Cama de aviário compostada	11.111,10	29,10	2,24	359,33	5301,39	351,38	313,21	323,38	24,94	3992,60	58904,30	3904,17	3480,09
Adubação mineral													
Ureia	224,00	3,46	2,41	0,00	10,48	0,00	0,48	0,78	0,54	0,00	2,35	0,00	0,11
Superfosfato simples	750,00	38,76	2,88	48,34	5322,10	362,16	66,16	29,07	2,16	36,26	3991,58	271,62	49,62
Cloreto de potássio	320,00	7,79	2,48	0,36	455,87	5,90	4,94	2,49	0,79	0,12	145,88	1,89	1,58

*Valores expressos em base seca