



Efeito do cobre em *Psidium guajava* com adição de bagaço de laranja no solo

Effect of copper on Psidium guajava with addition of orange bagasse in soil

Giuvana Lazzaretti¹, Hilda Hildebrand Soriani², Laura Regina da Silva³, Felipe Pansanato Aguiar Cruz⁴, Arci Dirceu Wastowski⁵, Nilton Cesar Mantovani⁶

RESUMO A citricultura desenvolveu-se muito, trazendo consigo o desenvolvimento das indústrias processadoras da laranja, no entanto, a geração de resíduos nesta atividade industrial é elevada. Objetivou-se avaliar a tolerância da espécie *Psidium guajava* em solo contaminado com cobre e adição de bagaço de laranja. O experimento foi conduzido de 01/2021 até 09/2021, e os tratamentos consistiram de 3 proporções de bagaço incorporado ao solo, e contaminados com diferentes concentrações de cobre, e transplantado as mudas. Determinou-se a massa seca, teor de cobre no composto e tecidos, cobre acumulado nos tecidos e índice de translocação. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial. A contaminação com cobre promoveu acréscimos nos teores de cobre total do composto, e a proporção de 50% de resíduo apresentou valores superiores. O cobre interferiu no desenvolvimento das mudas, reduzindo a massa seca, e elevou os teores de cobre acumulado nas plantas. As proporções 25 e 50% de resíduo promoveram reduções nos teores de cobre acumulado nas raízes e total, e na parte aérea, a proporção de 25% de resíduo promoveu aumento nos teores de cobre acumulado em comparação às demais. O índice de translocação reduziu com o aumento do cobre no composto e apresentou menores valores na proporção 0% de resíduo. A adição de 50% de resíduo e as concentrações de 200 e 400 mg Cu.Kg⁻¹ promoveram reduções na qualidade das mudas, verificada através de decréscimos de massa seca, além disso, através do índice de translocação, a *Psidium guajava* não mostrou-se uma planta viável para fitorremediação.

Palavras-chave: Fitorremediação; Índice de tolerância; Resíduo orgânico

ABSTRACT: Citriculture has developed a lot, bringing with it the development of orange processing industries, however, the generation of waste in this industrial activity is high. The objective was to evaluate the tolerance of *Psidium guajava* in soil contaminated with copper and the addition of orange bagasse. The experiment was conducted from 01/2021 to 09/2021, and the treatments consisted of 3 proportions of bagasse incorporated into the soil, and contaminated with different concentrations of copper, and transplanted seedlings. Dry mass, copper content in compost and tissues, copper accumulated in tissues and translocation index were determined. The experimental design was completely randomized in a factorial scheme. Copper contamination promoted increases in the total copper contents of the compost, and the proportion of 50% of residue showed higher values. Copper interfered with the development of seedlings, reducing the dry mass, and increasing the levels of copper accumulated in the plants. The proportions of 25 and 50% of residue promoted reductions in the levels of accumulated copper in the roots and total, and in the shoot, the proportion of 25% of residue promoted an increase in the levels of accumulated copper in comparison to the others. The translocation index reduced with the increase of copper in the compost and presented lower values in the proportion of 0% of residue. The addition of 50% of residue and the concentrations of 200 and 400 mg Cu.Kg⁻¹ promoted reductions in the quality of the seedlings, verified through decreases in dry mass, in addition, through the translocation index, *Psidium guajava* did not show any if a viable plant for phytoremediation.

Keywords: Organic waste; Tolerance index; Phytoremediation.

Autor correspondente: Giuvana Lazzaretti
E-mail: giuvalazzaretti@hotmail.com

Recebido em: 06/01/2022
Aceito em: 19/01/2023

¹ Universidade Federal de Santa Maria/campus Frederico Westphalen, Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria – campus Frederico Westphalen, Brasil.

² Universidade Federal de Santa Maria/campus Frederico Westphalen, Doutora do Departamento de Engenharia Florestal, e do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria – campus Frederico Westphalen.

³ Universidade Federal de Santa Maria/campus Frederico Westphalen, Graduanda do Curso de Engenharia Florestal, do Departamento de Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria – campus Frederico Westphalen.

⁴ Universidade Federal de Santa Maria/campus Frederico Westphalen, Graduanda do Curso de Engenharia Florestal, do Departamento de Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria – campus Frederico Westphalen.

⁵ Universidade Federal de Santa Maria/campus Frederico Westphalen, Doutor do Departamento de Engenharia e Tecnologia Ambiental, e do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria – campus Frederico Westphalen.

⁶ Universidade Federal de Santa Maria/campus Frederico Westphalen, Doutor do Departamento de Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria – campus Frederico Westphalen.

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da citricultura no Brasil, houve um grande aumento na produção de frutas como a laranja, possibilitando o surgimento de indústrias de processamento da fruta, porém, de acordo com Silva *et al.* (2016), estas geram elevadas quantidades de resíduos resultantes do esmagamento dos frutos, e seu principal destino é a suplementação animal ou armazenamento em lixões. Este tipo de destinação pode causar problemas ambientais e de saúde pública, além disso, a fermentação atrai insetos, roedores e promove mau cheiro, uma vez que estes resíduos representam inúmeras toneladas, sendo de interesse social, econômico e tecnológico a busca por estratégias que venham agregar valores a estes subprodutos.

O bagaço de laranja é um resíduo orgânico e quando incorporado ao solo provoca aumento deste material, e como hoje preconiza-se que sejam utilizadas práticas que objetivam a melhoria da qualidade do solo, com a finalidade de elevar os teores de matéria orgânica, através da adubação orgânica por resíduos de origem animal ou agroindustrial (Moral *et al.*, 2005), a utilização deste resíduo seria uma alternativa viável.

A adubação orgânica assegura a disponibilidade de nutrientes, promove a ciclagem de nutrientes dos resíduos, reduz as perdas dos mesmos por volatilização, erosão e lixiviação (goedert; oliveira, 2007). Dentre estes e outros efeitos positivos da matéria orgânica ao solo também vale destacar, segundo Silva e Mendonça (2007), que ocorre melhorias do poder tampão do solo, deixando o pH estável, aumentando a CTC, melhorando a estrutura do solo, possibilitando a complexação de metais, além de ser essencial no desenvolvimento das plantas e microrganismos, reduzindo os efeitos tóxicos dos metais pesados, aumentando a capacidade do solo de armazenar água, entre outros (FAO, 2006).

Alguns metais como o cobre e o zinco são considerados elementos essenciais para as plantas e animais, porém quando se encontram em concentrações elevadas segundo Ferreira *et al.* (2016), podem desencadear diversos danos morfológicos e fisiológicos nos vegetais, comprometendo seu desenvolvimento.

Geralmente metais ocorrem de forma natural no solo (Hugen *et al.*, 2013), porém, a contaminação por metais está cada vez mais frequente, devido ao avanço da urbanização e da industrialização. A inserção dos metais no solo ocorre através do descarte indevido de resíduos, seja urbano, agrícola ou industrial, ou através de insumos agrícolas e aplicações de fungicidas, como por exemplo, a calda bordalesa composta por sulfato de cobre (Arend, 2010), agricultura, mineração, eliminação de resíduos, entre outros (Yruela, 2005).

A disponibilidade do cobre pode ser avaliada de forma eficiente através de experimentos com plantas, nos quais é possível estabelecer as quantidades de cobre no solo que são consideradas limites para a toxidez em diferentes espécies, sendo que vários parâmetros devem ser utilizados para avaliar a toxicidade do cobre, como a biomassa e as taxas de crescimento da parte aérea e das raízes (Mantovani, 2009).

Nos últimos anos, vários estudos vêm sendo desenvolvidos sobre os efeitos de metais como o Cu e o Zn às plantas, pelo fato de serem micronutrientes para o desenvolvimento das mesmas, porém, em elevadas concentrações, podem causar efeitos de toxicidade às plantas (Zampieri, 2010).

Com este estudo objetivou-se avaliar a tolerância da espécie *Psidium guajava* L. (goiabeira) em solo contaminado com diferentes concentrações de cobre e aplicação de proporções de bagaço de laranja.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

O solo utilizado foi coletado em uma área erodida (profundidade de 0-20 cm) na Universidade Federal de Santa Maria *campus* Frederico Westphalen/RS, e classificado como Latossolo Vermelho (Santos,

et al., 2018), sendo posteriormente seco e peneirado. As características químicas do solo foram realizadas seguindo a metodologia de Tedesco *et al.*, (1995), em que os parâmetros avaliados foram os seguintes: classe textural 2, argila 42%, matéria orgânica 4,4%, fósforo 2,8 mg/L, potássio 222 mg/L, cálcio 7,7 mg/L, cobre 2,1 mg/L e zinco 1,7 mg/L.

O resíduo de laranja foi coletado imediatamente após a extração do suco e do óleo da laranja, na Indústria de Suco do Alto Uruguai – ISAU, localizada no município de Liberato Salzano/RS. O resíduo foi seco em condições ambientes, triturado em moinho forrageiro (peneira de 1 cm) e aplicado ao solo em proporções de 0, 25 e 50% v/v. Este composto foi acondicionado em vasos plásticos (4,5 L) com sacos plásticos em seu interior sendo mantido em sistema fechado para que não houvesse perdas por lixiviação.

O composto foi umedecido e homogeneizado periodicamente por um período de 120 dias, até a degradação parcial do resíduo, após este período, fez-se a contaminação do composto com diferentes concentrações de cobre (0, 50, 100, 200 e 400 mg.Kg⁻¹ de composto), sendo periodicamente homogeneizado e permanecendo em casa de vegetação climatizada com temperatura (± 25 °C) e umidade ($\pm 70\%$) controladas por 30 dias, mantendo-se a capacidade de campo em 75%.

Após o tempo de estabilização do cobre no composto, foi efetuado o transplântio das mudas de goiabeira (*Psidium guajava* L.) com 1 ano de idade, doadas pelo Viveiro Florestal do Departamento de Engenharia Florestal da UFSM/FW. A espécie foi escolhida por ser nativa e em decorrência de ser uma planta pioneira, e apresentar rápido desenvolvimento (Lourenço; Biagnolini, 2018). O experimento teve início no mês de janeiro de 2021 e foi conduzido até setembro do mesmo ano.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 3x5, com 4 repetições, sendo 3 proporções de resíduo/solo adicionado ao solo na composição de um composto (solo: resíduo, v/v) e 5 concentrações de cobre que consistiram de: 0% de resíduo + 100% de solo contaminado com 0, 50, 100, 200, 400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto; 25% de resíduo + 75% de solo contaminado com 0, 50, 100, 200, 400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto e 50% de resíduo + 50% de solo contaminado com 0, 50, 100, 200, 400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto.

2.2 ANÁLISES REALIZADAS

2.2.1 Massa seca, teor de cobre no composto e nos tecidos

As mudas foram mantidas em casa de vegetação por aproximadamente 100 dias, e após esse período foram separadas do composto manualmente e os órgãos (parte aérea e raízes) coletados separadamente e colocados em sacos de papel. As raízes foram lavadas em água corrente até se retirar o excesso de composto e posteriormente passaram por uma lavagem com EDTA 0,02 mol.L⁻¹ para retirar o excesso de metal adsorvido nas raízes. Os órgãos foram então secos a 60 °C por 48 horas.

Após a retirada das plantas, as amostras do composto (solo + resíduo) de cada vaso foram coletadas depois de realizada a homogeneização do composto, e secas em estufa de ar forçado a 60 °C por 3 dias.

A massa seca das raízes (MSRaízes) e a massa seca da parte aérea (MSPA) foram determinadas através de balança de precisão (g.planta⁻¹), com isso foi possível determinar a massa seca total (MST) através da soma da MSRaízes e a MSPA.

As amostras de parte aérea e raízes foram então trituradas com auxílio de moinho de facas, enquanto o composto foi macerado em cadinho para obtenção de um pó fino, necessário para confecção de pastilhas por meio de prensa hidráulica. A determinação do teor de cobre total no composto, teor de cobre na parte aérea e nas raízes da goiabeira foram realizadas no Laboratório de Análise e Pesquisas Químicas da UFSM

campus Frederico Westphalen/RS, por meio de um espectrômetro de fluorescência de raio-X por energia dispersa, EDX-720 (Wastowski *et al.*, 2010).

2.2.2 Cobre acumulado nos tecidos e índice de tolerância

Com base no teor de cobre quantificado no solo, na parte aérea e nas raízes das plantas, e na produção de massa seca, foram calculadas as quantidades de cobre acumulado nas raízes e na parte aérea, através da fórmula 1:

$$\text{CuA} = (\text{C} \times \text{MS})/1000 \quad (1)$$

Onde, CuA: cobre acumulado em mg.vaso⁻¹; C: concentração de Cu no órgão da planta em mg.Kg⁻¹; MS: massa seca do órgão produzida por vaso, em gramas.

O índice de translocação (IT) do cobre representa a porcentagem de cobre acumulado total (CuATotal) que passou para a parte aérea da planta (CuAPA), determinado através da fórmula 2 (Abichequer; Bohnen, 1998):

$$\text{IT}(\%) = ((\text{CuAPA})/\text{CuATotal}) \times 100 \quad (2)$$

2.2.3 Análise dos dados

Os dados foram submetidos à análise de variância com o software SISVAR 5.7 (Ferreira, 2011) e quando significativa à interação entre as fontes de variação proporções de resíduo e concentrações de cobre, as médias do primeiro fator foram comparadas através de teste Tukey ($\alpha=0,05$), enquanto as médias do segundo fator ajustadas por regressões polinomiais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teor de cobre total presente no composto apresentou interação significativa entre as fontes de variação concentrações de cobre e proporções de resíduo aplicado. Nas proporções de 0% e 50% de resíduo adicionado ao solo pode-se observar ajuste quadrático dos dados, enquanto que para a proporção de 25% de resíduo obteve-se ajuste linear dos dados (Figura 1).

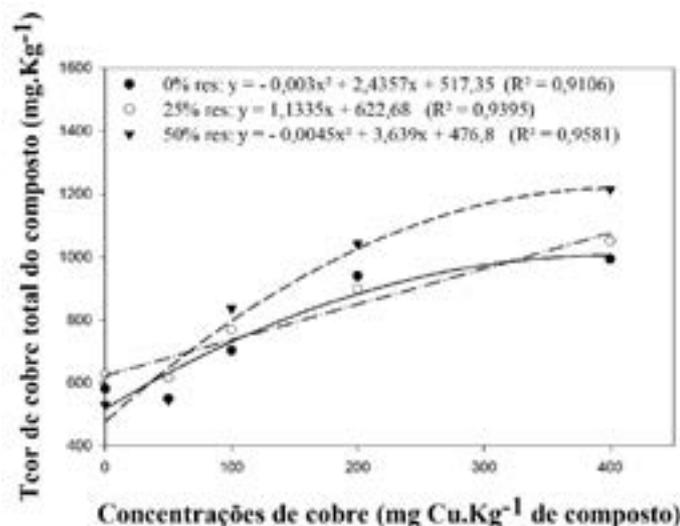


Figura 1. Teor de cobre do composto (solo+resíduo) com aplicação de diferentes proporções de resíduo (0, 25 e 50% de bagaço de laranja) e contaminado com diferentes concentrações de cobre (0, 50, 100, 200 e 400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto)
0% res: 0% de resíduo, 25% res: 25% de resíduo, 50% res: 50% de resíduo. Fonte: Elaborado pela autora.

Os teores de cobre total no composto foram maiores na proporção de 50% de resíduo adicionado ao solo quando comparado com as demais proporções utilizadas (0% e 25%), principalmente nas maiores concentrações de cobre adicionadas ao solo, ocorrendo acréscimos no teor de cobre do composto conforme o aumento da contaminação pelo metal. Quando comparado o tratamento com a maior concentração de cobre ($400 \text{ mg Cu.Kg}^{-1}$) com o tratamento sem contaminação (0 mg Cu.Kg^{-1}) na proporção de 50% de resíduo adicionado, verifica-se um aumento de aproximadamente 13 vezes na concentração de cobre do composto.

Considerando as proporções de 0% e 25% de resíduo adicionado ao solo, observa-se que o teor de cobre total do composto também aumentou conforme a contaminação pelo metal, apresentando acréscimos de 70,1% e 67,4% no teor de cobre total respectivamente, quando comparado a maior concentração de cobre ($400 \text{ mg Cu.Kg}^{-1}$) com a menor concentração (0 mg Cu.Kg^{-1}).

Os organismos que estão em exposição excessiva de cobre no solo, como por exemplo, as videiras (plantas expostas a altas concentrações de cobre devido à cultura), acabam sendo afetadas de forma negativa, e seu desenvolvimento se torna limitado (Ambrosini *et al.*, 2015). Geralmente as plantas necessitam de cobre para sua sobrevivência, porém este elemento deve permanecer em níveis baixos (Yruela, 2005) para não causar danos por toxicidade.

De acordo com Costa, Silva e Ribeiro (2013), os resíduos orgânicos presentes no solo, tanto de origem animal ou vegetal consistem nas principais fontes de deposição de materiais orgânicos no solo. Segundo Arend (2010), os compostos orgânicos presentes no solo podem interagir com os íons metálicos formando complexos mais estáveis, sendo assim, a matéria orgânica presente no solo é a principal responsável pela retenção dos metais do mesmo, indicando que a fração orgânica possui grande afinidade pelos cátions (Camargo, 2006), pois a matéria orgânica possui carga negativa e capacidade de formar quelatos orgânicos, desta forma promove a elevação nos teores de cobre complexados na forma orgânica insolúvel, permanecendo indisponível no solo não sendo absorvido pelas plantas (Bertoncini; Mattiazzi, 1999).

Neste estudo, cada proporção de bagaço adicionada ao solo interagiu de forma distinta com o cobre, com maiores valores de cobre encontrados no composto com adição de 50% de resíduo, enquanto que os tratamentos com as proporções de 0% e 25% de resíduo de laranja obtiveram valores inferiores do metal. Esta resposta pode estar relacionada ao teor de matéria orgânica introduzida no solo, pois, com a degradação do resíduo, pode ter ocorrido a liberação do cobre retido inicialmente no resíduo em um volume reduzido de solo, o que causou um efeito de concentração do metal.

Quando realizada a análise de variância, os dados de massa seca total não apresentaram interação entre as fontes de variação (proporções de resíduo e concentrações de cobre), verificando-se ajuste linear dos dados, com redução na massa seca total à medida em que se aumentou a concentração de cobre no composto (Figura 2A). Quando comparado o tratamento sem contaminação (0 mg Cu.Kg^{-1} de composto) com o tratamento com $400 \text{ mg Cu.Kg}^{-1}$ de composto obteve-se redução de 15% na massa seca total.

Como observado na Figura 2B, a massa seca total não diferiu entre as proporções 0 e 25% de resíduo, diferindo apenas entre estas e a proporção 50%, com menor valor nesta última, com uma redução média de 27,2% em relação aos demais tratamentos.

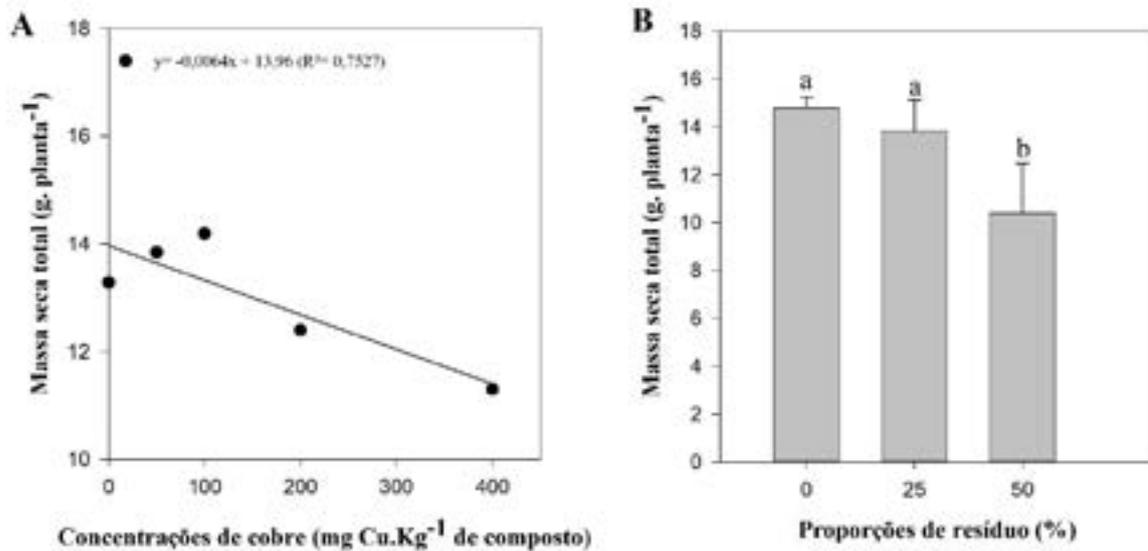


Figura 2. Massa seca total da goiabeira crescida em solo com aplicação de resíduo (bagaço de laranja) em diferentes proporções (0, 25 e 50%) e contaminado com diferentes concentrações de cobre (0, 50, 100, 200 e 400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto) Teste de Tukey. Barras seguidas de letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa entre proporções de resíduo, com $\alpha=0,05\%$. Fonte: Elaborada pela autora.

Com os dados de massa seca total é evidente a redução nesta variável à medida que a concentração de cobre foi acrescida no composto, provocando desequilíbrios no desenvolvimento da planta, pois, o excesso de cobre causa efeitos deletérios às mesmas.

Segundo Yruela (2005), as plantas cultivadas em locais com alta presença de cobre, normalmente apresentam reduções na biomassa, e segundo Chaves *et al.* (2010), que avaliaram pinhão-mansó sob doses crescentes de cobre, também observaram reduções na massa seca total da planta, confirmando o efeito observado do cobre no presente trabalho sobre a goiabeira.

Em estudo de Mantovani (2009), em que submeteu-se o milho a doses crescentes de cobre, foi constatado que as raízes e as folhas apresentaram maior produção de massa seca até 100 mg Cu.Kg⁻¹ de solo, a partir de 200 mg Cu.Kg⁻¹ de solo houve redução significativa da massa seca, estando esta resposta relacionada ao menor teor inicial de cobre neste solo, pois se trata de um elemento essencial para o desenvolvimento das plantas, estando relacionado a diversos processos fisiológicos e bioquímicos das plantas (Haque; Aduayi; Sibanda, 1993), por outro lado, quando ocorre excesso de cobre, os efeitos morfológicos observados são má formação dos tecidos das raízes, alterando assim o crescimento e o desenvolvimento de outras partes da planta, como a parte aérea (Mantovani, 2009).

Em relação às proporções de resíduo, as raízes se apresentaram mais desenvolvidas em solo com menores proporções de bagaço, e a massa seca da parte aérea também se desenvolveu mais nas proporções reduzidas de resíduo aplicado ao solo (0% e 25%) do que na proporção de 50% de resíduo, indicando que esta última não foi benéfica para o desenvolvimento das plantas, podendo esse ser atribuído ao excesso de umidade acumulada nos vasos.

Após realizada a análise de variância, verificou-se que os teores de cobre acumulado nas raízes (CuAR) da goiabeira não apresentaram interação entre as fontes de variação (proporções de resíduo e concentrações de cobre). No entanto, houve ajuste linear dos dados para as concentrações de cobre, indicando que a crescente contaminação por cobre do composto levou a acréscimos nos teores de cobre acumulado nas raízes (Figura 3A). Comparando-se o teor de CuAR no maior nível de contaminação (400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto) com o tratamento sem contaminação (0 mg Cu.Kg⁻¹ de composto), observa-se que houve um aumento de 408% no teor de cobre acumulado nas raízes (Figura 3A).

Conforme a Figura 3B, os teores CuAR das plantas, nas 3 proporções de resíduo aplicado ao solo diferiram estatisticamente entre si, com maior valor verificado no tratamento sem adição de resíduo (100% solo) e, menor valor observado no tratamento com adição de 50% de resíduo.

Com a elevação nos teores de cobre no solo através da contaminação por cobre, o teor acumulado do metal nas raízes da goiabeira tornou-se visivelmente elevado (Figura 3A), este fator também foi observado em solos com cultivo de videiras, no qual a planta apresentou maiores teores de cobre em suas raízes (Tiecher *et al.*, 2017). Além da videira, Arduini, Godbold e Onnis (1995), observaram acréscimos nos teores de cobre nas raízes de pinus, o qual apresentou alterações nas características das raízes, promovendo redução no alongamento das raízes na presença de cobre, assim como Seidel, Costa e Lana (2009), verificaram que solo contaminado por cobre aumentou os teores de cobre nas raízes do milho. Em geral, o aumento do teor de matéria orgânica no solo auxilia a reter o metal, pois este se complexa com a matéria orgânica (Camargo, 2006), reduzindo os efeitos tóxicos quando o metal se apresenta em excesso.

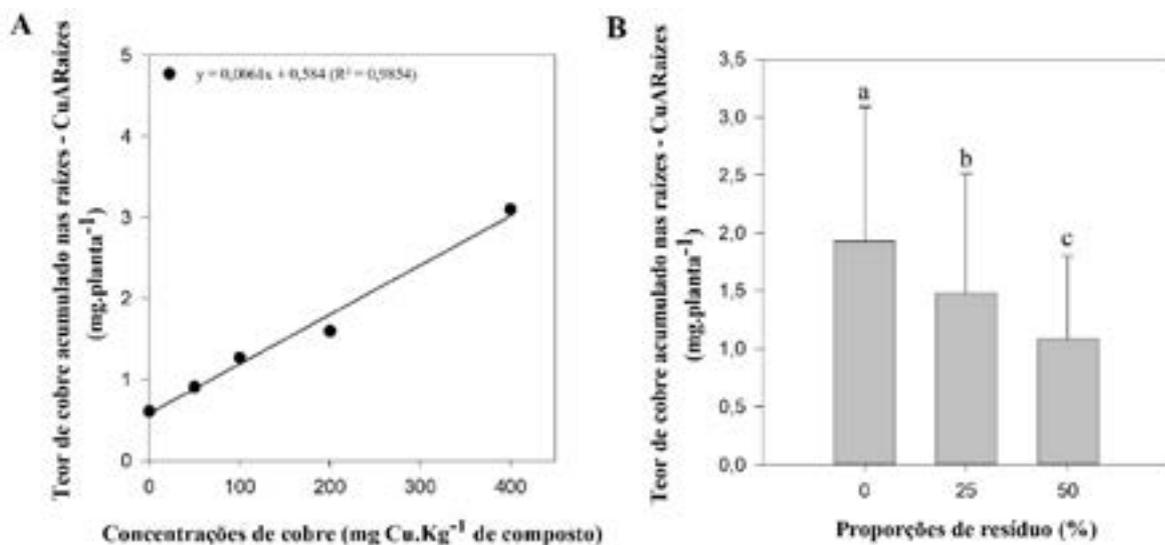


Figura 3. Teor de cobre acumulado nas raízes (CuAR) da goiabeira crescidas em solo com aplicação de resíduo (bagaço de laranja) em diferentes proporções (0, 25 e 50%) e contaminado com diferentes concentrações de cobre (0, 50, 100, 200 e 400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto)

Teste de Tukey. Barras seguidas de letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa entre proporções de resíduo, com $\alpha=0,05\%$. Fonte: Elaborada pela autora.

Para os dados de teores de cobre acumulado na parte aérea (CuAPA) da goiabeira houve interação entre as fontes de variação (proporções de resíduo adicionado ao solo e concentrações de cobre) quando realizada a análise de variância. Nas proporções de 0, 25 e 50% de resíduo adicionado ao solo pode-se observar ajuste quadrático dos dados para CuAPA (Figura 4), com ponto de mínimo em 76 mg Cu.Kg⁻¹ de composto e 52 mg Cu.Kg⁻¹ de composto para 0 e 50% de resíduo respectivamente, e a proporção de 25% de resíduo adicionado ao solo apresentou ponto de máximo na concentração de 180 mg Cu.Kg⁻¹ de composto.

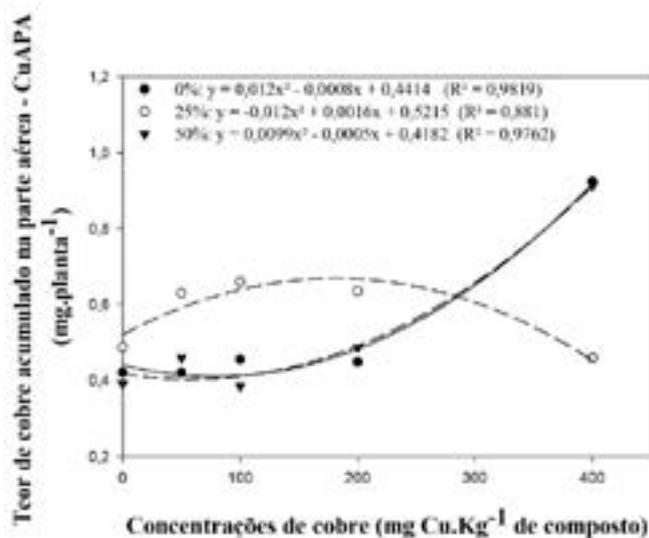


Figura 4. Teor de cobre acumulado na parte aérea (CuAPA) da goiabeira crescida em solo com aplicação de resíduo (bagaço de laranja) em diferentes proporções (0, 25 e 50%) e contaminado com diferentes concentrações de cobre (0, 50, 100, 200 e 400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto)

0% res: 0% de resíduo, 25% res: 25% de resíduo, 50% res: 50% de resíduo. Fonte: Elaborada pela autora.

O tratamento com 25% de resíduo adicionado ao solo apresentou os maiores teores de cobre acumulado na parte aérea em relação às demais proporções de resíduo (0 e 50%), com exceção apenas para a maior concentração de cobre (400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto), ocorrendo acréscimo de cobre na parte aérea à medida que se aumentou a contaminação pelo metal até a concentração de 100 mg Cu.Kg⁻¹ de composto, e posteriormente havendo redução do CuAPA de cerca de 6,2% na maior concentração de cobre (400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto), em comparação ao tratamento sem cobre (0 mg Cu.Kg⁻¹ de composto) (Figura 4).

Os tratamentos com 0% e 50% de resíduo aplicado no solo apresentaram resposta semelhante, com acréscimos de 12 e 13 vezes nos teores de cobre acumulado na parte aérea respectivamente, quando comparado o tratamento sem cobre e o tratamento com 400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto (Figura 4).

De acordo com Kabata-Pendias e Pendias (2001), a maioria das espécies podem acumular cobre principalmente nas raízes, pois segundo Lavado, Porcelli e Alvarez (2001), as raízes das plantas apresentam maiores teores de cobre em relação às folhas, fato este relacionado à baixa translocação do cobre das raízes para a parte aérea. Em estudos de Seidel, Costa e Lana (2009), com milho, os autores utilizaram doses de matéria orgânica e diferentes doses de contaminação por cobre, foi também observado maiores teores de cobre nas raízes do que na parte aérea.

No solo ocorre a adsorção dos micronutrientes, que consiste em um processo de união dos metais com as superfícies coloidais, controlando a quantidade e movimentação dos metais na solução do solo, consequentemente, reduzindo a disponibilidade para as plantas (Camargo, 2006), pois as plantas absorvem prontamente o cobre dissolvido na solução do solo (Kabata-Pendias; Pendias, 2000).

A menor proporção de resíduo não foi suficiente para reduzir a disponibilidade de cobre para a planta, sendo assim, pode-se considerar que o tratamento com 25% de resíduo apresentou cobre mais prontamente disponível para a planta do que a proporção com 50% de resíduo, devido à matéria orgânica diminuir a disponibilidade de metais para as plantas, em razão da formação de complexos estáveis (Martins *et al.*, 2003), no entanto, na maior proporção de resíduo adicionado ao solo, o crescimento das plantas foi afetado pelo ambiente com excesso de umidade, pois o incremento de matéria orgânica no solo também contribui para a retenção de água (Araújo; Tormena; Silva, 2004).

Para a proporção 0% de resíduo adicionado ao solo pressupõe-se que o cobre permaneceu nas raízes (Figura 3B), não sendo translocado em grandes quantidades para a parte aérea, fator este relacionado às raízes atuarem como filtros naturais, no qual impedem que o cobre seja transferido para o restante da planta quando em excesso (Seidel; Costa; Lana, 2009).

O teor de cobre acumulado total (CuAT - raízes + parte aérea) não apresentou interação entre as fontes de variação (proporções de resíduo e concentrações de cobre), quando realizada a análise de variância dos dados, sendo verificado ajuste linear para as concentrações de cobre, indicando que a crescente contaminação por cobre promoveu aumento nos teores CuAT (Figura 5A). Quando comparado o tratamento sem contaminação por cobre com o tratamento com 400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto, observou-se um acréscimo de 267,3% no teor de CuAT (Figura 5A).

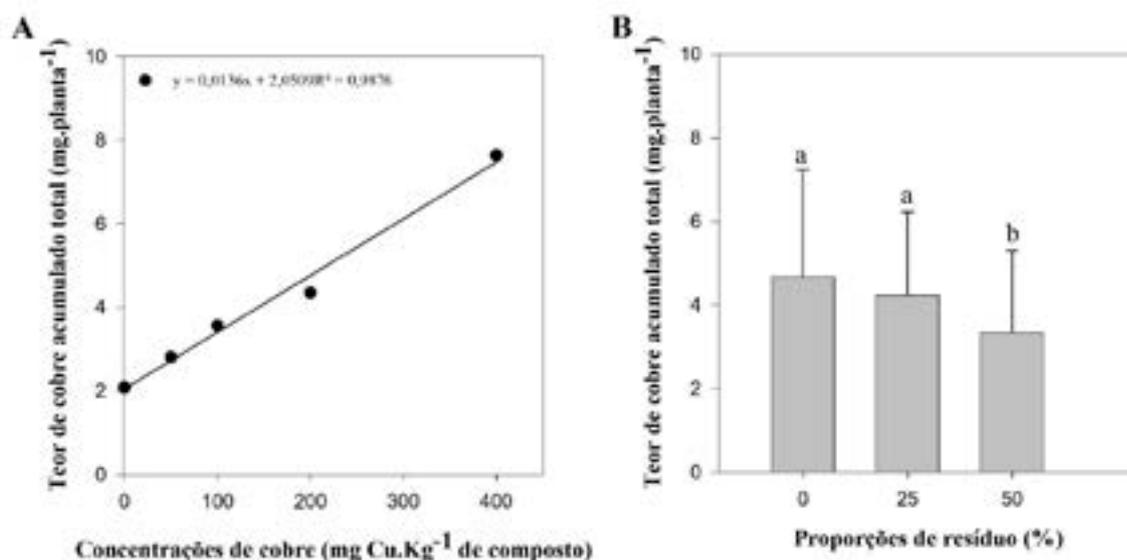


Figura 5. Teor de cobre acumulado total (CuAT - raízes + parte aérea) em goiabeira crescida em solo com aplicação de resíduo (bagaço de laranja) em diferentes proporções (0, 25 e 50%) e contaminado com diferentes concentrações de cobre (0, 50, 100, 200 e 400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto)

Teste de Tukey. Barras seguidas de letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa entre proporções de resíduo, com $\alpha=0,05\%$. Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com a Figura 5B, o teor de cobre acumulado total quantificado nas proporções de 0% e 25% de resíduo não diferiram entre si, enquanto que na proporção de 50% de resíduo apresentou menor média, diferindo das demais.

Arend (2010) também observou que a adição de sulfato de cobre no solo provocou aumento nas concentrações de cobre, tanto na parte radicular como na parte aérea da videira, causando efeito linear entre o cobre disponível e o cobre adicionado, indicando que quanto mais cobre adicionado ao solo, maior é o teor de cobre disponível. Quando as concentrações de cobre no ambiente atingem valores muito elevados, este elemento pode desencadear sérios problemas de toxidez para as plantas (Tiecher, *et al.*, 2017).

Segundo Yruela (2005), a inibição do crescimento da planta geralmente ocorre após a exposição da planta a altas concentrações de cobre, desencadeando reações que provocam danos oxidativos nos tecidos vegetais, afetando os principais processos celulares, como a permeabilidade da membrana, estrutura da cromatina, a síntese de proteínas e atividade enzimática na fotossíntese, além de afetar os processos respiratórios.

Quando realizada a análise de variância para o índice de translocação (IT), este apresentou interação entre as fontes de variação (proporções de resíduo e concentrações de cobre), sendo que para

as proporções de 0 e 50% de resíduo adicionado ao solo o ajuste dos dados foi quadrático com ponto de mínimo em 347,5 e 377,5 mg Cu.Kg⁻¹ de composto respectivamente, enquanto que para a proporção de 25% de resíduo adicionado ao solo houve ajuste linear dos dados (Figura 6).

A proporção de 0% de resíduo adicionado ao solo apresentou os menores valores de índice de translocação quando comparada com as demais proporções, com exceção apenas na maior concentração de cobre (400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto). O tratamento com 25% de resíduo adicionado ao solo apresentou redução de 72% no índice de translocação quando comparada a maior concentração de cobre (400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto) com a menor concentração (0 mg Cu.Kg⁻¹ de composto).

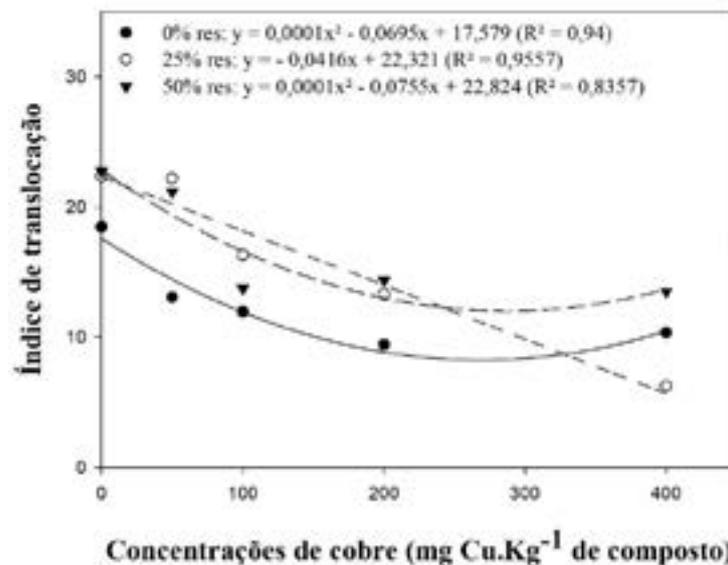


Figura 6. Índice de translocação do cobre em goiabeira crescida em solo com aplicação de resíduo (bagaço de laranja) em diferentes proporções (0, 25 e 50%) e contaminado com diferentes concentrações de cobre (0, 50, 100, 200 e 400 mg Cu.Kg⁻¹ de composto)

0% res: 0% de resíduo, 25% res: 25% de resíduo, 50% res: 50% de resíduo. Fonte: Elaborada pela autora.

O índice de translocação representa o movimento ou a transferência do íon do local de absorção na raiz para outra parte da planta, ou seja, o índice de translocação representa a porcentagem da quantidade total do metal que foi transferida para a parte aérea (Abichequer; Bohnen, 1998).

O índice de translocação foi maior nas menores concentrações de cobre do composto, sendo que, a partir do momento em que se aumentou a concentração do metal no composto, o índice de translocação foi reduzido. Quando o índice de translocação se apresenta elevado, indica que maior quantidade de cobre está sendo translocado para a parte aérea (Tito; Chaves; Vasconcelos, 2016), caso contrário, menos cobre será transferido para a parte aérea.

Em trabalho desenvolvido por Chaves *et al.* (2010), os autores avaliaram o índice de translocação do cobre no pinhão-mansinho sob efeito de doses crescentes do metal, no qual constataram que o índice de translocação também reduziu conforme o aumento nas concentrações do cobre. Enquanto que De Marco *et al.* (2021), avaliando o índice de translocação do cobre em corticeira-do-banhado com aplicação de turfa obtiveram resultados semelhantes, em que a adição de turfa proporcionou valores mais elevados do índice de translocação em comparação ao solo sem a turfa, além de ser observado redução acentuada do índice de translocação conforme o aumento da contaminação por cobre.

A redução no índice de translocação nas maiores concentrações de cobre está relacionada aos mecanismos de tolerância ao excesso de cobre que as plantas possuem, no qual imobilizam o cobre na

parede celular das raízes (Marschner, 1995), promovendo baixa translocação para a parte aérea, sendo assim, as raízes contribuem para a tolerância das plantas a metais pesados (Pulford; Watson, 2003).

O índice de translocação reforça o que foi visto para massa seca, em que as plantas sob maior exposição ao cobre desenvolveram-se menos do que as plantas submetidas ao solo sem contaminação pelo metal, desta forma é translocado menos cobre para a parte aérea. Geralmente em solos com a presença de altos teores de cobre, o metal tende a se acumular preferencialmente na raiz, sendo considerada pequena a quantidade de metal que é transportada para a parte aérea (Giroto *et al.*, 2014).

De acordo com Ambrosini *et al.* (2016a), apesar do cobre ser essencial para as plantas, em caso de excesso pode resultar em toxidez e prejudicar o desenvolvimento das mesmas. Em casos que ocorram estresses severos para as plantas, as mesmas poderão entrar em fase de esgotamento, deteriorando-se até sua morte (Shinozaki *et al.*, 2015), pois as estruturas das raízes são danificadas, reduzindo assim a absorção de água e de nutrientes, e por consequência seu desenvolvimento (Ambrosini *et al.*, 2016b; Bochicchio *et al.*, 2015).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adição de resíduo ao solo na proporção de 50%, assim como a contaminação do composto com concentrações de 200 e 400 mg de Cu.Kg⁻¹ provoca redução na qualidade das mudas de *Psidium guajava*, verificada através de decréscimos na massa seca. O teor de cobre no composto aumenta de acordo com a concentração de cobre aplicada no mesmo, sendo que o teor de cobre acumulado nas raízes teve acréscimos de acordo com o aumento da concentração do metal e redução conforme aumento da proporção de resíduo aplicado ao solo, mesma resposta obtida para o cobre acumulado total.

O índice de translocação é reduzido com o aumento da contaminação por cobre e se apresenta menor na menor proporção de resíduo adicionada ao solo e indica que a goiabeira não é uma planta viável para fitorremediação nas condições testadas.

5 AGRADECIMENTO

Agradecemos a CAPES pelo auxílio financeiro prestado para o desenvolvimento deste estudo, e ao CNPq pelo incentivo à pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABICHEQUER, André Dabdab; BOHNEN, Humberto. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.1, p.21- 26, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000100003>

AMBROSINI, Vitor Gabriel et al. Impacto do excesso de cobre e zinco no solo sobre videiras e plantas de cobertura. In: MELO, G. W. B. de et al. **Calagem, adubação e contaminação em solos cultivados com videiras**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2016. Cap. 6. p. 91-110.

AMBROSINI, Vitor Gabriel et al. Liming as an ameliorator of copper toxicity in black oat (*Avena strigosa* Schreb.). **Journal of Plant Nutrition**, [s. l.], v.40, p.404-416, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1240203>

AMBROSINI, Vitor Gabriel et al. Reduction of copper phytotoxicity by liming: A study of the root anatomy of young vines (*Vitis labrusca* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 96, p. 270–280, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.08.012>

ARAÚJO, Marcelo Alessandro; TORMENA, Cássio Antonio; SILVA Alvaro Pires da. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 337-345, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/mff5y8xXY3tQ3cJHnL6KbXH/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 06 out. 2021.

ARDUINI, Iduna; GODBOLD, Douglas L.; ONNIS, Antonio. Influence of copper on root growth and morphology of *Pinus pinea* L. and *Pinus pinaster* Ait. seedlings. **Tree Physiology**, Victoria, Canadá, v.15, n.6, p.411-415, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/15.6.411>

AREND, Karine. **Substâncias húmicas e formas de cobre em solos de área de videiras**. 2010. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/3317/AREND%2C%20KARINE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 16 out. 2021.

BERTONCINI, Edna Ivani; MATTIAZZO, Maria Emília. Lixiviação de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.3, p.737-744, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300029>

BOCHICCHIO, Rocco. et al. Root architecture and morphometric analysis of *Arabidopsis thaliana* grown in Cd/Cu/Zn-gradient agar dishes: A new screening technique for studying plant re-sponse to metals. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 91, p. 20–27, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.03.010>

CAMARGO, Otávio Antônio de. Reações e interações de micronutrientes no solo. **Infobio**, 2006. 21p. Disponível em: <https://www.ufjf.br/baccan/files/2019/04/Nutrientes-e-Solo.pdf>. Acesso em: 05 out. 2021.

CHAVES, Lucia Helena Garófalo. et al., Crescimento, distribuição e acúmulo de cobre e zinco em plantas de pinhão-manso. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.41, n.2, p.167-176, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902010000200001>

COSTA, Elaine Martins da; SILVA, Helene França; RIBEIRO, Paula Rose de Almeida. Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção e produtividade dos sistemas agrícolas. **Enciclopédia biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, n.17, p.1842-1860, 2013. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2013b/CIENCIAS%20AGRARIAS/materia%20organica.pdf>. Acesso em: 02 out. 2021.

DE MARCO, Rudinei. et al. *Erythrina crista-galli* L. e turfa na fitorremediação de cobre no solo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.31, n.1, p. 475-490, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509818914>

FERREIRA, Daniel Furtado. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>

FERREIRA, Paulo Ademar Avelar. et al. Estratégias de amenização da fitotoxidez de metais pesados em solos de vinhedos. **Embrapa Uva e Vinho**, v.1, p.111-138, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Guidelines for Soil Description**. Food and Agriculture 1362. Organization of the United Nations. Rome, 2006. 109p. Disponível em: <https://www.fao.org/publications/card/en/c/903943c7-f56a-521a-8d32-459e7e0cdae9/>. Acesso em: 06 set. 2021.

GIROTTO, Eduardo. et al. Copper availability assessment of Cu-contaminated vineyard soils using black oat cultivation and chemical extractants. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 186, n. 12, 2014.

GOEDERT, Wenceslau J.; OLIVEIRA, Sebastião A. Fertilidade do solo e sustentabilidade da atividade agrícola. In: NOVAIS, R. F. et al (Eds). **Fertilidade do Solo**, Viçosa, p.991-1017, 2007.

HAQUE, I.; ADUAYI, E. A.; SIBANDA, S. Copper in soils, plants, and ruminant animal nutrition with special reference to sub-Saharan África. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.16, n.11, p. 2149-2212, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904169309364680>

HUGEN, Camila. et al. Teor de Cu e Zn em perfis de solo de diferentes litologias em Santa Catarina. **Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.6, p.622–628, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000600008>

KABATA-PENDIAS, Alina; PENDIAS, Henryk. **Trace elements in soil and plants**. 3.ed. Boca Raton: CRC Press, 2001. 403p.

KABATA-PENDIAS, Alina; PENDIAS, Henryk. **Trace Elements in Soils and Plants**. 3. ed. Edition, London: CRC Press, 2000. 432p.

LAVADO, Raul Silvio; PORCELLI, Claudia A.; ALVAREZ, Roberto. Nutrient and heavy metal concentration and distribution in corn, soybean and wheat as affected by different tillage systems in the Argentine Pampas. **Soil & Tillage Research**, v.62, n.1-2, p.55-60, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00216-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00216-1)

LOURENÇO, Roberto Wagner; BIAGOLINI, Carlos Humberto. Relação entre avifauna e plantas frutíferas em 10 parques lineares da cidade de São Paulo, (Brasil). **Revista Eletrônica Conhecimento Interativo**, v. 12, n. 2, p. 70-81, jul./dez. 2018. Disponível em: <http://app.fiepr.org.br/revistacientifica/index.php/conhecimentointerativo/article/view/275/296>. Acesso em: 02 fev. 2021.

MANTOVANI, Analú. **Composição química de solos contaminados por cobre: formas, sorção e efeito no desenvolvimento de espécies vegetais**. 2009. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/17085/000710287.pdf?s>. Acesso em: 02 nov. 2021.

MARSCHNER, Horst. **Mineral nutrition of higher plants**. 2.ed. London, Academic Press, 1995.889p.

MARTINS, A. L. C. et al. Produção de grãos e absorção de Cu, Fe, Mn e Zn pelo milho em solo adubado com lodo de esgoto, com e sem calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.3, p.563-574, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/kXWqsb9NQ4ZYxVsyYB4TLkf/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 out. 2021.

MORAL, Raúl et al. Characterization of the organic matter pool in manures. **Bioresource Technology**, v.96, n.2, p.153-158, 2005.

PULFORD, I., WATSON, C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees: a review. **Environment International**, [S. l.], v. 29, n. 4, p. 529-540, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00152-6](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00152-6)

SANTOS, Humberto Gonçalves dos. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília: EMBRAPA, 2018. 355p.

SEIDEL, Edleusa Pereira; COSTA, Antônio Carlos Saraiva da; LANA, Maria do Carmo. Fitodisponibilidade de cobre e produção de matéria seca por plantas de milho em resposta à aplicação de dejetos de suínos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.6, p.1871-1878, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/smwkFZYXtLTMF8vzfBFCxRq/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 out. 2021.

SHINOZAKI, K. et al. Responses to abiotic stress. In: BUCHANAN, Bob B.; GRUISSEM, Wilhelm; JONES, Russell L. **Biochemistry e Molecular Biology of Plants**. 2 ed. Chichester: John Wiley e Sons, Ltd, 2015.1264p.

SILVA, Carlos Eduardo de Farias. et al. Uso da laranja lima e seus resíduos no desenvolvimento de novos produtos. **Brasilian Journal of Biosystems Engineering**, [S. l.], v.10, n.1, p.69-96, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18011/bioeng2016v10n1p69-96>

SILVA, Ivo Ribeiro da; MENDONÇA, Eduardo de Sá. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, RobertoFerreira. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, 2007. 275-374p.

TEDESCO, Marino José. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS,1995. 170p.

TIECHER, Tadeu Luis. et al. Principais doenças da videira e contaminação de solos de vinhedos com cobre e zinco. **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: impacto das atividades agropecuárias na contaminação do solo e da água**, URI, Frederico Westphalen, 2017. 183p.

TITO, Gilvanise Alves; CHAVES, Lúcia Helena Garófalo; VASCONCELOS, Ana Carolina Feitos de. Acúmulo e translocação de cobre e zinco em plantas de *Crambe abyssinica*. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 11, n.4, p. 12-16, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18378/rvads.v11i4.4539>

WASTOWSKI, Arci Dirceu. et al. Caracterização dos níveis de elementos químicos em solo, submetido a diferentes sistemas de uso e manejo, utilizando espectrometria de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDXRF). **Química Nova**, [S. l.], v. 33, n. 7, 1449-1452, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000700005>

YRUELA, Inmaculada. Copper in plants. **Braz. J. Plant Physiology**, [S. l.], v.17, n.1, p.145-156, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100012>

ZAMPIERI, Maria Cristina Tessari. **Estudo sobre os efeitos do cobre e zinco no crescimento da plântula de *Aechmea blanchettiana* (Baker) L. B. Smith cultivada *in vitro*. Aplicação da análise por ativação com nêutrons**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2010.