

Article

Vermicomposto na Fitorremediação do Cobre por Aveia Preta (*Avena strigosa* SCHREB, 1771), na Lixiviação de Nutrientes e Metais Pesados em um Solo Arenoso

Fernanda Cantoni¹, Natielo Almeida Santana², Nathalie Caroline Hirt Kessler³, Álvaro Luís Pasquetti Berghetti⁴, Paulo Ademar Avelar Ferreira⁵, Rodrigo Josemar Seminoti Jacques⁶, Zaida Ines Antonioli⁷

¹ Doutora. Universidade Federal de Santa Maria. ORCID: 0000-0002-6574-4305. E-mail: cantoni.f@hotmail.com.

² Doutor. Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. ORCID: 0000-0003-2461-144X. E-mail: natielo_sm@hotmail.com.

³ Doutora. Universidade Federal de Santa Maria. ORCID: 0000-0002-3628-9964. E-mail: nathalie.kessler@gmail.com.

⁴ Doutor. Universidade Federal do Paraná. ORCID: 0000-0001-8020-3200. E-mail: alvaro.berghetti@ufpr.br.

⁵ Doutor. Universidade Federal de Santa Maria. ORCID: 0000-0002-5622-6303. E-mail: paulo.ferreira@ufsm.br.

⁶ Doutor. Universidade Federal de Santa Maria. ORCID: 0000-0002-8240-5145. E-mail: rodrigo@ufsm.br.

⁷ Doutora. Universidade Federal de Santa Maria. ORCID: 0000-0003-2036-8710. E-mail: zantonioli@gmail.com.

RESUMO

Fungicidas cúpricos são aplicados em videiras para prevenção e controle de doenças fúngicas, porém, podem contaminar o solo com cobre, o que demanda técnicas como a fitorremediação para a solução deste problema. O objetivo deste estudo foi avaliar doses de vermicomposto na fitorremediação do cobre por *Avena strigosa*, e na lixiviação em solo arenoso. As plantas de *A. strigosa* foram cultivadas em vasos na casa de vegetação, em um solo arenoso de vinhedo contaminado com 25 mg kg⁻¹ de cobre. Os tratamentos constituíram-se das doses de vermicomposto equivalentes a 0, 5, 10, 20 e 40 ton ha⁻¹. Lixiviações foram induzidas a cada 15 dias após a semeadura. No florescimento, foram determinadas massa seca, atividade de enzimas do estresse oxidativo, teores de nutrientes e metais pesados. O vermicomposto reduziu a fitotoxicidade de cobre, e na dose de 10 ton ha⁻¹ aumentou a produção de massa seca e o acúmulo de cobre, em comparação ao solo sem vermicomposto. Na dose de 10 ton ha⁻¹ o lixiviado apresentou concentrações de cobre, zinco, manganês e fósforo inferiores às doses de 20 e 40 ton ha⁻¹. Elevadas doses de vermicomposto não devem ser utilizadas na fitorremediação de solos arenosos devido ao risco de contaminação subsuperficial por metais pesados.

Palavras-chave: contaminação; vinhedo; adubo orgânico; aveia preta; biorremediação.

ABSTRACT

Copper-based fungicides are applied to grapevines for the prevention and control of fungal diseases; however, they can contaminate the soil with copper, necessitating techniques such as phytoremediation to address this issue. The aim of this study was to evaluate vermicompost doses in the phytoremediation of copper by *Avena strigosa* and the leaching of metals in sandy soil. *Avena strigosa* plants were grown in pots in a greenhouse, in sandy vineyard soil contaminated with 25 mg kg⁻¹ of copper. The treatments consisted of vermicompost doses equivalent to 0, 5, 10, 20, and 40 ton ha⁻¹. Leaching was induced every 15 days after sowing. At flowering, dry mass, oxidative stress enzyme activity, and nutrient and heavy metal contents were determined. Vermicompost reduced copper phytotoxicity, and at the dose of 10 ton ha⁻¹, it increased dry mass production and copper accumulation, compared to the soil without vermicompost. At the 10 ton ha⁻¹ dose, the leachate showed concentrations of copper, zinc, manganese, and phosphorus lower than



Submissão: 30/09/2024



Aceite: 03/04/2025



Publicação: 05/06/2025



those at the 20 and 40 ton ha⁻¹ doses. High doses of vermicompost should not be used in the phytoremediation of sandy soils due to the risk of subsurface contamination by heavy metals.

Keywords: contamination; vineyard; organic fertilizer; black oat; bioremediation.

Introdução

A contaminação dos solos com cobre (Cu) ocorre em diversos países devido às atividades de mineração, descarte inadequado de resíduos, adição de fertilizantes e aplicação de produtos fitossanitários (Campillo-Cora et al. 2019; Chileshe et al. 2020; Covre et al. 2022). Em áreas de vinhedos, essa contaminação é amplificada pelo uso sucessivo e em altas doses de fungicidas cúpricos, como a calda bordalesa (Ca(OH)₂ + CuSO₄) (Morsch et al. 2024). Esse problema tem sido amplamente reportado em regiões vinícolas da Campanha Gaúcha, extremo sul do Brasil (Silva et al. 2022b), onde os solos, predominantemente arenosos, nesta região apresentam baixa CTC (Capacidade de Troca Catiônica), reduzido teor de argila e matéria orgânica, favorecendo a mobilidade do Cu e aumentando seu potencial fitotóxico para as plantas e o ambiente (Morsch et al. 2024).

O Cu é um micronutriente essencial para os organismos vivos, por atuar como cofator enzimático em processos essenciais como fotossíntese, na respiração e cadeia de transporte de elétrons, além compor genes de defesa e proteínas estruturais (Kumar et al. 2021; Mir et al. 2021a). No entanto, o excesso desse metal no solo pode comprometer o crescimento e a produtividade vegetal (Mir et al. 2021a), causando desestabilização da membrana celular, redução da fotossíntese e alteração da atividade enzimática, podendo levar à morte das plantas (Shabbir et al. 2020). Em vinhedos, quando presente em concentrações elevadas, o Cu pode provocar alterações morfológicas e fisiológicas tanto nas videiras quanto nas plantas de cobertura do solo (De Conti et al. 2019). Estudos indicam que solos agrícolas não contaminados apresentam teores naturais de Cu entre 2 e 20 mg kg⁻¹, enquanto valores superiores a 30 mg kg⁻¹ em solos arenosos já são considerados contaminantes, podendo afetar negativamente a vegetação (De Conti et al., 2018; Morsch et al., 2024). Em vinhedos do sul do Brasil, foram detectados teores superiores a 35 mg kg⁻¹, evidenciando a necessidade de estratégias de remediação (Schwalbert et al., 2021).

A fitorremediação é uma estratégia promissora para reduzir a disponibilidade e a mobilidade de Cu em solos contaminados permitindo sua extração ou estabilização por meio de plantas adaptadas a esses ambientes (Marques et al. 2023). Entretanto, mesmo espécies fitorremediadoras podem enfrentar dificuldades de crescimento em solos altamente contaminados, tornando necessária a aplicação de materiais amenizantes que favoreçam o estabelecimento das plantas e reduzam a toxicidade do metal. O vermicomposto, por exemplo, tem sido utilizado para esse fim devido ao elevado teor de matéria orgânica, capaz de complexar metais pesados e modificar sua disponibilidade no solo, estimular a atividade biológica e promover crescimento vegetal (Santana et al. 2018; Rangel et al. 2023). O vermicomposto também pode reduzir a mobilidade de metais pesados no solo devido a presença de substâncias húmicas e grupos funcionais carregados negativamente, como ácidos carboxílicos, hidroxilas fenólicas e alcoólicas, que formam complexos com metais pesados do solo (Wang et al. 2018).

A lixiviação de elementos químicos é um fator determinante na avaliação da eficiência da fitorremediação, especialmente em solos arenosos, onde a mobilidade de nutrientes e metais pesados é elevada devido à baixa CTC e maior permeabilidade do solo (Bolan et al., 2021). A adição de vermicomposto pode influenciar diretamente esse processo, pois contém substâncias como ácidos húmicos e fúlvicos, que podem tanto imobilizar metais pesados quanto aumentar sua solubilidade e lixiviação (Hamedi et al., 2021). Estudos demonstram que o cobre lixiviado pode ser transportado na forma de complexos solúveis com matéria orgânica dissolvida, aumentando o risco de contaminação das águas subterrâneas (Filipović et al., 2023). Além disso, o



fósforo (P), frequentemente presente em altas concentrações no vermicomposto, pode ser mobilizado no solo, intensificando o risco de eutrofização de corpos d'água (Jordán et al., 2020). Elementos como zinco (Zn) e manganês (Mn) também podem se tornar mais móveis devido à mineralização da matéria orgânica, levando a perdas de nutrientes essenciais para as plantas e à possível toxicidade ambiental (Facco et al., 2023). Assim, a avaliação da lixiviação de Cu, P, Zn e Mn é essencial para entender os impactos da aplicação do vermicomposto em solos contaminados e garantir que essa estratégia de fitorremediação não represente riscos ambientais adicionais (Shrestha et al., 2019).

A utilização do vermicomposto como amenizante na fitorremediação de solos contaminados com Cu é um tema que ainda carece de mais estudos, especialmente no que se refere à lixiviação dos metais pesados em solos arenosos. A hipótese deste estudo é que o vermicomposto reduz os efeitos fitotóxicos do Cu, aumenta o crescimento da planta e não promove a lixiviação de metais e do fósforo no solo contaminado. Diante desse contexto, o objetivo deste estudo foi verificar o efeito de doses crescentes do vermicomposto na fitorremediação do Cu por aveia preta, na lixiviação de nutrientes e metais pesados em um solo arenoso de vinhedo.

Material e Métodos

Solo e vermicomposto

O solo classificado como Acrisol (IUSS Working Group WRB 2015) foi coletado na profundidade de 0-20 cm em um vinhedo da Campanha Gaúcha, no município de Santana do Livramento, Rio Grande do Sul, Brasil (30°48'27"S e 55°22'42"W). O solo foi seco ao ar, peneirado em malha de 2 mm, analisado conforme Tabela 1 e posteriormente o pH foi corrigido para 6,0, conforme recomendação do CQFS 2016, com carbonato de cálcio, conforme recomendações técnicas para a cultura da aveia. Após o solo foi incubado cerca de 150 kg de solo, por 30 dias com umidade controlada a 70% da capacidade de campo pela adição de água destilada, quando necessário. A contaminação do solo com 25 mg kg⁻¹ de Cu (Brunetto et al., 2023) foi realizada em laboratório pela adição de sulfato de cobre (33%) e cloreto de cobre (66%), seguido de incubação por 30 dias, totalizando 60 dias de incubação do solo desde o início do processo. Estudos anteriores quantificaram, em solos arenosos de vinhedos da região da Campanha Gaúcha, teores de Cu de ~35 mg Cu kg⁻¹Mehlich⁻¹ (Schwalbert et al. 2021; Brunetto et al. 2023; Morsch et al. 2024) e relataram toxidez em plantas de cobertura das entrelinhas dos vinhedos (Miotto et al. 2017). Com bases nestas informações optou-se por utilizar o teor de 25 mg Cu kg⁻¹Mehlich⁻¹, acima dos valores naturais observados na maioria dos solos brasileiros, porém próximo teores de Cu observados em solos de vinhedos desta região.

O vermicomposto foi produzido a partir de um composto orgânico que continha 70% (v/v) de casca de arroz e 30% (v/v) de dejetos de bovinos de leite (Tabela 1; Vione et al., 2018). O processo de compostagem foi realizado durante 60 dias, com revolvimentos e umedecimentos frequentes, por meio de rega manual, a fim de manter o teor de água entre 40 e 60%. Após a estabilização da temperatura mesofílica, o composto orgânico foi destinado ao processo de vermicompostagem, que ocorreu em canteiros de alvenaria com cobertura. Foram inoculadas 1,718 minhocas adultas (0,2 m³ de composto) da espécie *Eisenia andrei* Bouché (1972). A vermicompostagem ocorreu por 150 dias com umidade gravimétrica ~80%.

Cultivo das plantas e delineamento experimental

A aveia preta (*Avena strigosa* Schreb, 1771) foi cultivada em casa de vegetação, em vasos confeccionados com garrafas PET de 2 L, com o gargalo virado para baixo, facilitando assim a coleta de lixiviado. Foi adicionado



1.5 kg de solo contaminado com cobre. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com cinco tratamentos, correspondente as doses de 0, 5, 10, 20 e 40 ton ha⁻¹ de vermicomposto e cinco repetições. Desta forma, cada vaso recebeu 0, 3.75, 7.5, 15 ou 30 g do vermicomposto, respectivamente. No tratamento sem vermicomposto (dose 0) o solo recebeu 7 mg kg⁻¹ de P e 8.8 mg kg⁻¹ de K via solução de KH₂PO₄ para permitir a produção de massa seca suficiente para as análises (CQFS 2016). A semeadura foi realizada no início do mês de abril, com sete sementes por vaso, deixando-se três plântulas após o desbaste. A umidade do solo foi ajustada diariamente através de pesagem dos vasos e adição de água destilada. A colheita foi realizada no florescimento, aos 52 dias após emergência.

Coleta e análise do lixiviado

Para realizar a coleta do lixiviado foi adicionado cerca 300 mL de água destilada por vaso, o que ocasionou a saturação do solo. Durante 2 horas, todo o lixiviado escoado foi coletado em frascos alocados abaixo dos vasos cultivados com aveia preta. O procedimento foi realizado nos dias 01, 15, 30, 45 e 52 após a semeadura. O lixiviado foi armazenado a temperatura de 4° C até a determinação do pH, teores de Cu, Zn, Fe e Mn em espectrofotômetro de absorção atômica (932 AA, GBC, Austrália) e P por colorimetria (Murphy e Riley 1962).

Enzimas antioxidativas

Aos 50 dias após a emergência, uma folha inteira de cada planta foi coletada, imediatamente acondicionada a um recipiente com N₂ líquido e posteriormente armazenada em ultrafreezer (-80 °C) para determinação da atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD) e peroxidases não específicas (POD) (Zeraik et al. 2008). A atividade da superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1) foi determinada de acordo com Giannopolitis e Ries (1977). Uma unidade de atividade da SOD foi definida como a quantidade de enzima que inibiu 50% da fotoredução do nitroazul de tetrazólio (NBT 50%) (Beauchamp & Fridovich 1971). A atividade das peroxidases não específicas (POD, EC 1.11.1.7) foi determinada de acordo com Zeraik et al. (2008), utilizando guaiacol como substrato e um coeficiente de extinção molar de 26,6 mmol L⁻¹ cm⁻¹ (Chance & Maehley 1955). Uma unidade POD é definida como a quantidade de enzima que catalisa a conversão de guaiacol e peróxido de hidrogênio para formar 1 μmol de tetraguaiacol min⁻¹ mL⁻¹ de extrato a 470 nm (SF325NM, Bel Engineering, Itália).

Massa seca e análise química das plantas e do solo

As plantas foram coletadas no florescimento e as raízes foram separadas manualmente, lavadas em água corrente, em solução de EDTA 0,02 mol L⁻¹ e por último em água destilada. A parte aérea e as raízes foram secas em estufa de circulação de ar a 65°C até massa constante. Os teores de Cu, P, K, Mg, Fe e Zn na parte aérea e Cu na raiz foram determinados em espectrofotômetro de absorção atômica (932 AA, GBC, Austrália) após digestão nítrico-perclórica (Teixeira et al., 2017). O teor de N na parte aérea foi determinado pelo método Kjeldahl⁻¹ (Bremner & Mulvaney 1982) após digestão sulfúrica dos tecidos. Também foram determinados o conteúdo de Cu acumulado (teor de metal × biomassa) na parte aérea (E) e raízes. Os teores de Cu, Zn, Fe, Mn, P e K do solo foram extraídos por Mehlich-3. O K foi determinado em fotômetro de chama (DM-62, DIGIMED, Brasil), o P por colorimetria e os demais em espectrofotômetro de absorção atômica.

Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey (p < 0.05) e por análise de regressão, no software R (R Core Team 2020). Por fim, procedeu-se a análise



de componentes principais (PCA) e foi construída a matriz de correlação entre os parâmetros avaliados. Para a matriz, foram calculados os coeficientes de correlação linear de Spearman, com 5% de significância.

Resultados

O vermicomposto utilizado como amenizante para o cultivo da aveia preta apresentou características que permitem sua adição ao solo, de acordo com os parâmetros mínimos estabelecidos pela legislação brasileira (Brasil 2020) (Tabela 1). Destacam-se os elevados teores P e K deste adubo orgânico, que por consequência, causaram aumentos significativos no solo, assim como dos teores de Mg e do Mn (Tabela 1). Entretanto, as concentrações de Cu disponível, Zn e Fe do solo não apresentaram diferenças com o aumento das doses do vermicomposto adicionado ao solo na avaliação realizada após o cultivo da aveia preta (Cu $p=0.139$ e Zn $p=0.544$).

Tabela 1. Características do vermicomposto e do solo, no início do experimento e após cultivo com *Avena strigosa* em solo contaminado com 25 mg kg⁻¹ de Cu e doses de vermicomposto de 0, 5, 10, 20 e 40 ton ha⁻¹.

Parâmetro	Vermicomposto	Solo Inicial	Solo após o cultivo (dose, t ha ⁻¹)				
			0	5	10	20	40
pH	7.2	6.8	6.6ns	6.5 ns	7.1ns	7.1ns	6.8ns
M.O. (%)	n.d.	1.20	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
C.O. (g kg ⁻¹) ¹	170	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
N total (%)	1.1	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Argila (%)	n.d.	12	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Areia (%)	n.d.	54	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Al ³⁺ (cmolc L ⁻¹)	nd	0.10	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
CTC	n.d.	4.90	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
P (g kg ⁻¹) ¹	4.00	n.d	5.53d	10.83cd	12.86c	21.45b	36.28a
K (g kg ⁻¹) ¹	4.00	n.d	22.60b	22.00b	22.20b	24.00b	32.20a
Ca cmolc L ⁻¹	0.48	2.07	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Mg (mg kg ⁻¹)	1.20	60.70	111.34c	134.83c	140.27c	184.36b	259.77a
Cu (mg kg ⁻¹)	131.50	24.80	35.20ns	36.10 ns	35.10 ns	34.77 ns	35.10 ns
Zn (mg kg ⁻¹)	64.90	7.90	13.95ns	11.44 ns	15.73 ns	13.57 ns	16.12 ns
Fe (mg kg ⁻¹)	34.50	n.d	18.03ns	18.90 ns	19.08 ns	19.31 ns	18.73 ns
Mn (mg kg ⁻¹)	201.60	n.d	99.03ab	94.74b	98.87ab	97.36ab	104.67a

n.d: não determinado.

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey com $p<0.05$. ^{ns} Não significativo.

Fonte: Elaborado pelos Autores

Crescimento da planta e concentração de cobre

A adição de vermicomposto ao solo aumentou a massa seca da parte aérea e raízes das plantas de aveia preta em comparação à adubação mineral ($p < 0.05$; Figura 1A e Figura 1B). Estes aumentos foram de até 50% na parte aérea e nas raízes. Os teores de Cu na parte aérea e nas raízes da aveia preta não alteraram na presença das diferentes doses do vermicomposto ($p_{\text{parte aérea}} = 0.187$; $p_{\text{raiz}} = 0.09$; Figura 1C e Figura 1D). Porém, em relação ao tratamento sem vermicomposto (V0), a adição de vermicomposto ao solo aumentou a fitoextração (massa seca x teor de Cu no tecido) em até 45% na parte aérea (Figura 1E).

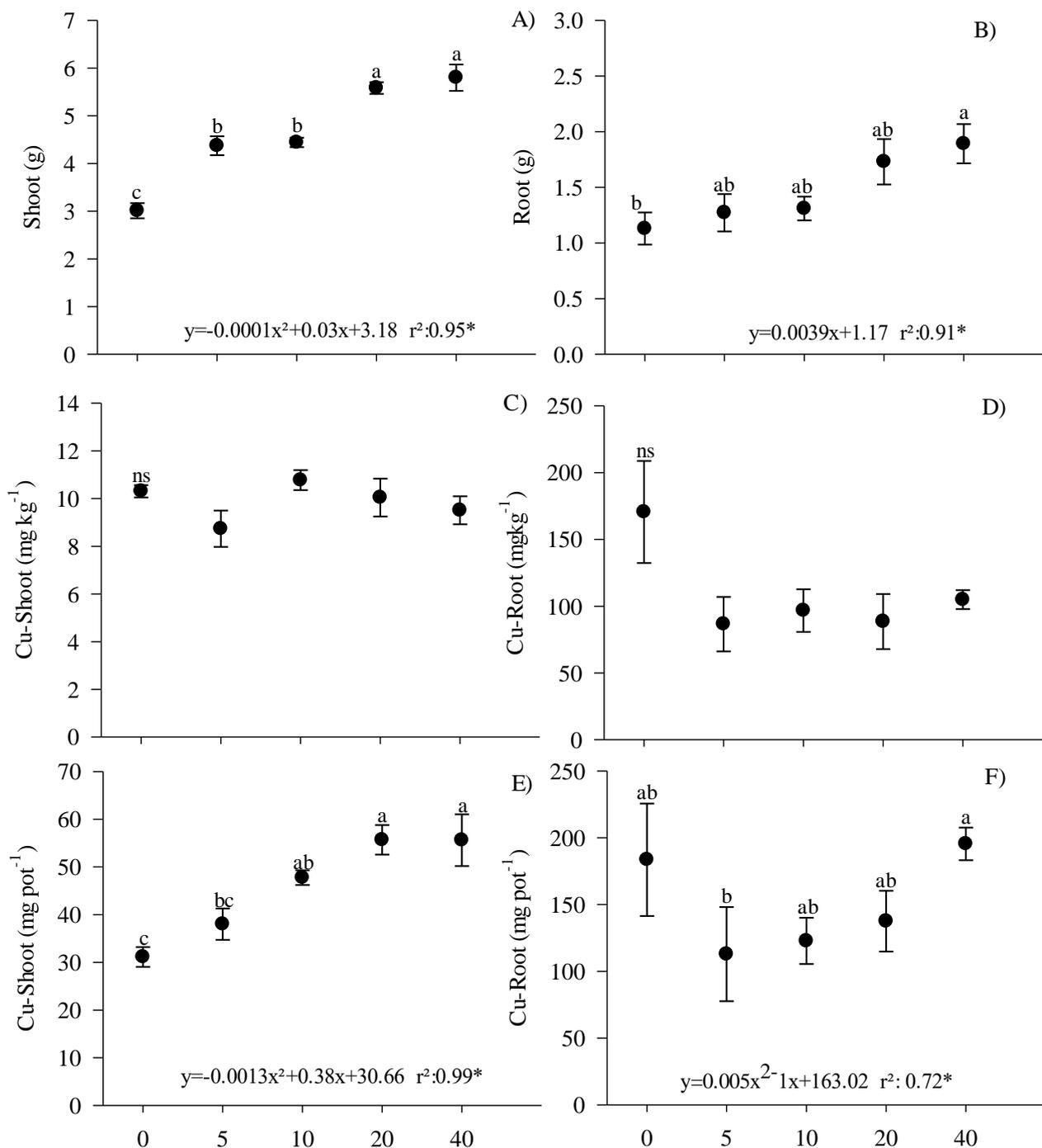


Figura 1 - Massa seca de parte aérea (A) e raízes (B), teor de Cu na parte aérea (C) e raízes (D), e conteúdo de Cu acumulado (teor de metal × biomassa) na parte aérea (E) e raízes (F) de *Avena strigosa* cultivada em solo arenoso após contaminação com 25 mg kg⁻¹ de Cu e adição de vermicomposto em doses equivalentes a 0, 5, 10, 20 e 40 ton ha⁻¹. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste Tukey com $p < 0.05$. * significativo com $p < 0.05$. ns: não significativo.

Fonte: Elaborado pelos Autores

Atividade das enzimas de estresse oxidativo

As plantas de aveia preta que receberam 20 e 40 ton ha⁻¹ de vermicomposto apresentaram maior atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) nas folhas, em média, 43% superior aos demais tratamentos (Figura



2A). Porém, maiores atividades das peroxidases não específicas (POD) foram observadas nas folhas das plantas cultivadas nas doses de 10 e 20 ton ha⁻¹ (Figura 2B).

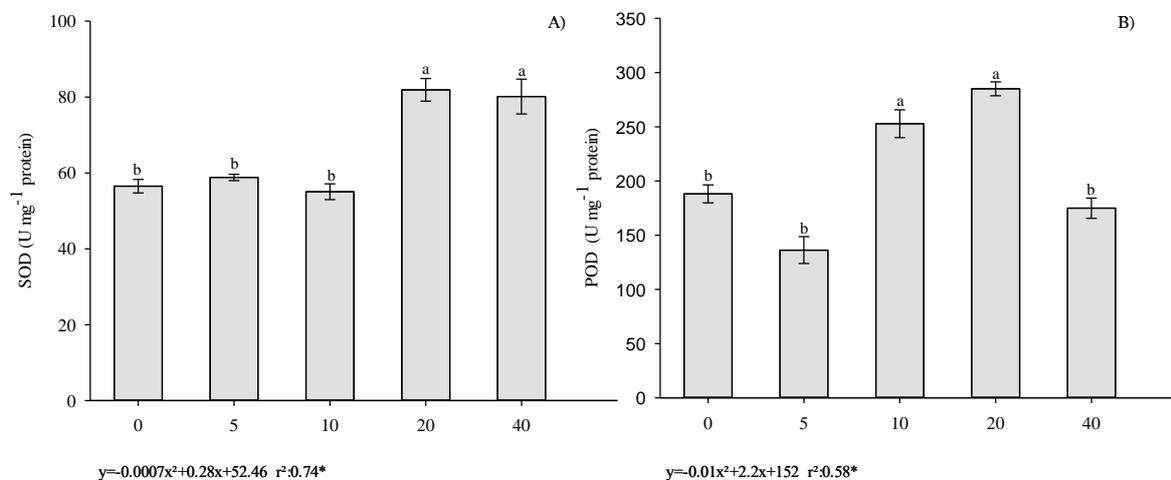


Figura 2. Atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD) e peroxidases não específicas (POD) em folhas de *Avena strigosa* cultivada em solo arenoso após contaminação com 25 mg kg⁻¹ de Cu e adição de vermicomposto em doses equivalentes a 0, 5, 10, 20 e 40 ton ha⁻¹. *significativo com $p < 0.05$. ns: não significativo. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste Tukey com $p < 0.05$.

Fonte: Elaborado pelos autores

Lixiviado

Na primeira data (um dia após a instalação do experimento) em que foi realizada a lixiviação induzida dos elementos do solo pela adição de excesso de água, a lixiviação de cobre foi baixa, sendo menor que 300 µg L⁻¹ (Figura 3a). Na segunda avaliação (aos 15 dias), a concentração do Cu no lixiviado atingiu o maior valor, ainda que sem apresentar diferenças estatísticas entre os tratamentos. Nesta coleta houve aumento linear da concentração de cobre no lixiviado entre as doses 0 e 20 t ha⁻¹ e nesta dose foi observado o valor máximo de cobre no lixiviado quantificado em todo o experimento, que foi de 2.924 µg L⁻¹. O aumento da dose do vermicomposto para 40 t ha⁻¹ não aumentou a lixiviação, mas a manteve elevada (2.032 µg L⁻¹). Na última avaliação (52 dias) verificou-se aumento linear estatisticamente significativo da concentração de Cu no lixiviado com incremento da dose do vermicomposto. Porém, todos os valores foram inferiores aos observados aos 15 dias (média de 395,6 µg L⁻¹). No tratamento sem vermicomposto, o teor total de cobre lixiviado foi de 3.103 µg L⁻¹, enquanto nas doses de 20 e 40 t ha⁻¹ estes valores foram de 5.360 e 4.777 µg L⁻¹, respectivamente.

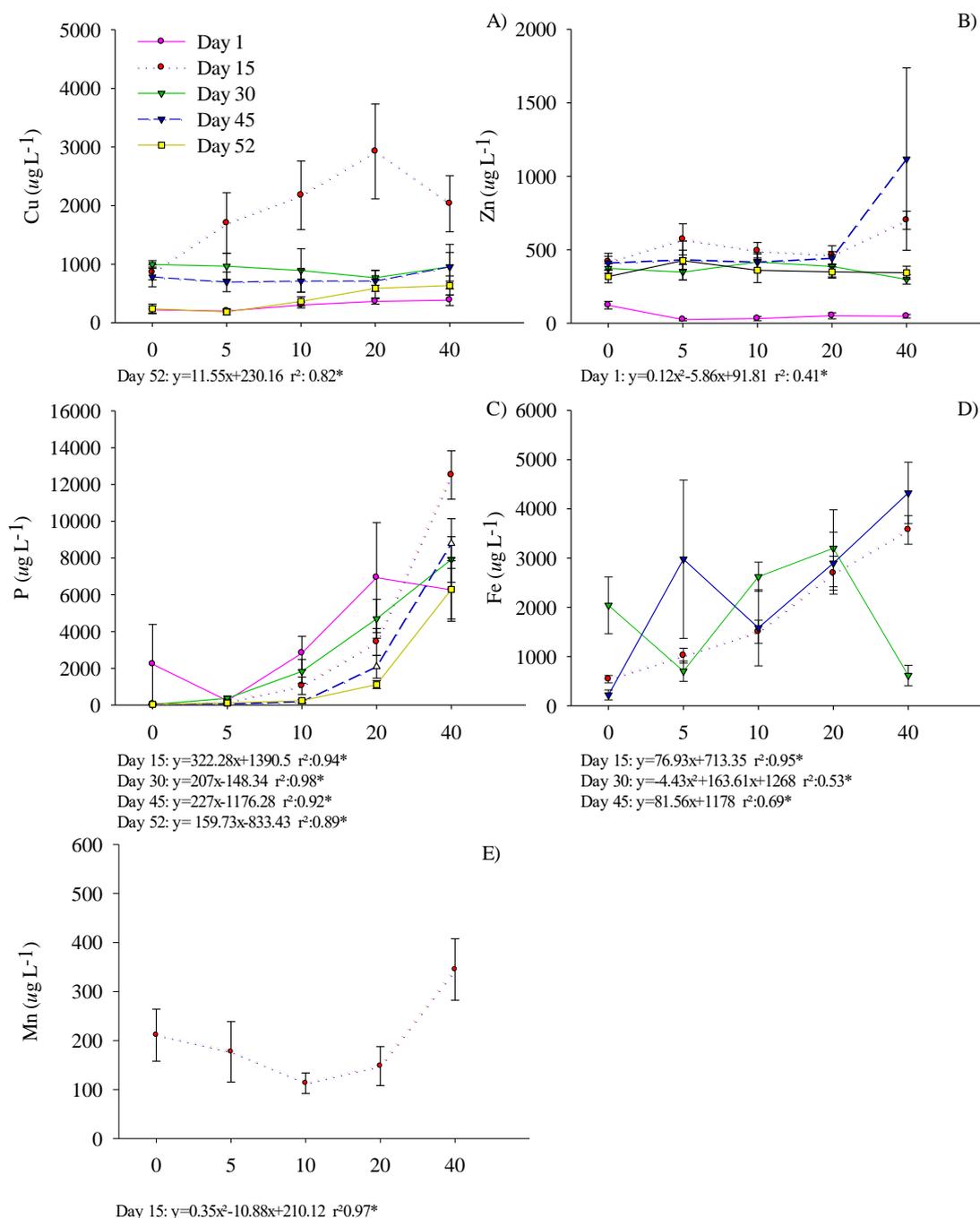


Figura 3. Teor de Cu (A), Zn (B), P (C), Fe (D) e Mn (E) no lixiviado coletado nas datas 01, 15, 30, 45, 52 dias após a semeadura da *Avena strigosa* em solo arenoso contaminado com 25 mg kg^{-1} de Cu e com doses de 0, 5, 10, 20 e 40 ton ha^{-1} de vermicomposto. * significativo com $p < 0.05$. ns: não significativo. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste Tukey com $p < 0.05$. * significativo com $p < 0.05$. ns: não significativo.

Fonte: Elaborado pelos Autores.

A concentração de zinco no lixiviado foi baixa na avaliação realizada no primeiro dia após a instalação do experimento em todos os tratamentos (média de $280 \mu\text{g L}^{-1}$) (Figura 3B). No entanto, as concentrações aumentaram nas avaliações seguintes. Aos 15 dias, a concentração média foi de $490 \mu\text{g L}^{-1}$, sem diferença estatística entre os tratamentos, mas com tendência de aumento em resposta ao aumento da dose do vermicomposto. Na avaliação realizada aos 52 dias foi verificado um incremento, porém não significativo



($p=0.339$), na concentração do Zn no lixiviado do solo que recebeu a maior dose, atingindo o valor de $552 \mu\text{g L}^{-1}$.

A concentração de P no lixiviado aumentou em resposta ao aumento da dose de vermicomposto adicionada ao solo (Figura 3C). Na primeira avaliação, o maior valor ($6.670 \mu\text{g L}^{-1}$) foi observado na dose de 20 ton ha^{-1} , ainda que sem diferenças estatísticas entre os tratamentos. Nas demais coletas houve aumento estatisticamente significativos da concentração de P do lixiviado como consequência ao aumento das doses do vermicomposto. Na maior dose (40 ton ha^{-1}), a concentração total de fósforo no lixiviado foi de $40.520 \mu\text{g L}^{-1}$, enquanto na menor dose (5 ton ha^{-1}), foi de $1.966 \mu\text{g L}^{-1}$, inferior à do controle ($2.340 \mu\text{g L}^{-1}$), que apresentou maior concentração devido à aplicação de adubação fosfatada mineral nesse tratamento.

Nas coletas dos dias 01 e 52 as concentrações de Fe foram abaixo do limite detectável pela metodologia utilizada. Aos 15 e 45 dias foi verificado aumento linear na concentração de Fe no lixiviado, com destaque para as maiores doses de vermicomposto (20 e 40 ton ha^{-1} ; Figura 3D). O total de Fe no lixiviado foi cerca de 95% maior nas doses de 20 e 40 ton ha^{-1} de vermicomposto, em comparação ao controle. O Mn não foi detectado na primeira data de lixiviação. Na segunda data, a maior concentração ocorreu no lixiviado da maior dose de vermicomposto (40 ton ha^{-1}), onde foi observado um incremento de aproximadamente $200 \mu\text{g L}^{-1}$ em relação à média dos demais tratamentos (Figura 3E).

Análise de Componentes Principais

A PCA explicou 56,4% da variabilidade dos dados (Figura 4). A maior parte da variação no conjunto original de dados (35,3%) foi explicada pelo primeiro componente (Fator 1), que foi principalmente associado à massa seca de raízes e parte aérea; K, P e Mg no solo; K e Mn no tecido; teores de Cu e P no lixiviado; e atividade da SOD e POD. Estas variáveis foram relacionadas com as maiores doses de vermicomposto (20 e 40 ton ha^{-1}), que aumentaram o crescimento da planta e atenuaram os efeitos tóxicos do Cu pelo maior aporte nutricional e/ou pelo aumento da atividade de enzimas antioxidativas. A atividade da SOD apresentou correlação positiva com o teor de P no tecido ($\rho: 0.62$) e negativa com o teor de Mn ($\rho: -0.70$). Os maiores teores de nutrientes no solo (K, Mg e P) nas maiores doses apresentaram correlação positiva com a melhor nutrição de P (Pshoot) e produção de biomassa da planta (Root e Shoot; Figura 5). Em contrapartida, nestes tratamentos foram verificados os maiores teores de Cu e P no lixiviado, evidenciando possível risco de contaminação. A segunda componente da PCA explicou 20,3% da variação do conjunto de dados e apresentou relação com os teores de Cu, Fe, Mn e Zn no solo e N, Fe, Zn, Cu no tecido. O alto teor de Cu no solo e no tecido resultou na redução do crescimento das plantas ($\rho_{\text{root \& Cu}}: -0.59$; $\rho_{\text{shoot \& Cu}}: -0.37$; $\rho_{\text{root \& Cshoot}}: -0.24$; $\rho_{\text{shoot \& Curoot}}: -0.42$; $\rho_{\text{shoot \& Cshoot}}: -0.22$; $\rho_{\text{root \& Cshoot}}: -0.46$). Os tratamentos com as menores doses (5 e 10 ton ha^{-1}) de vermicomposto apresentaram relação com estas variáveis. O teor de Mn na parte aérea da planta foi a única variável relacionada ao tratamento sem adição de vermicomposto.

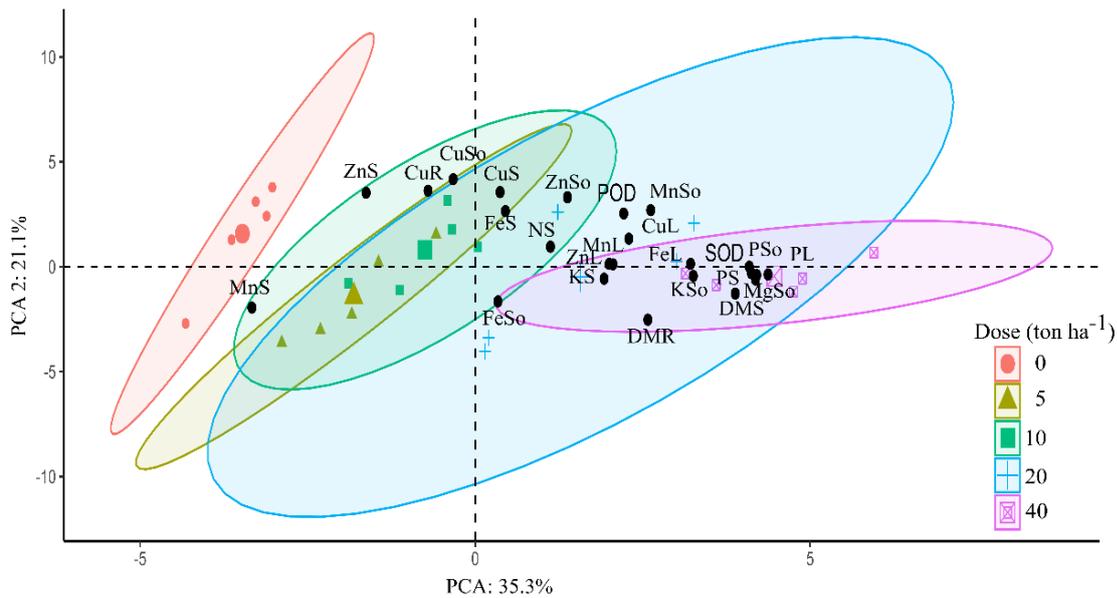


Figura 4. Análise de componentes principais considerando as variáveis massa seca de parte aérea (DMS), raiz (DMR), teor de cobre (CuS), zinco (ZnS), ferro (FeS), manganês (MnS), nitrogênio (NS), potássio (KS) em parte aérea, cobre em raiz (CuR), atividade da peroxidase (POD) e superóxido dismutase (SOD) no tecido foliar, teores de cobre (CuSo), zinco (ZnSo), ferro (MnSo), manganês (MnSo), fósforo (PSo) e potássio (KSo) no solo, concentrações de Cu (CuL), Zn (ZnL), P (PL), Mn (MnL) e Fe (FeL) totais no lixiviado e as doses de vermicomposto de 0, 5, 10, 20 e 40 ton ha⁻¹. * significativo com $p < 0.05$. ns: não significativo.

Fonte: Elaborado pelos Autores

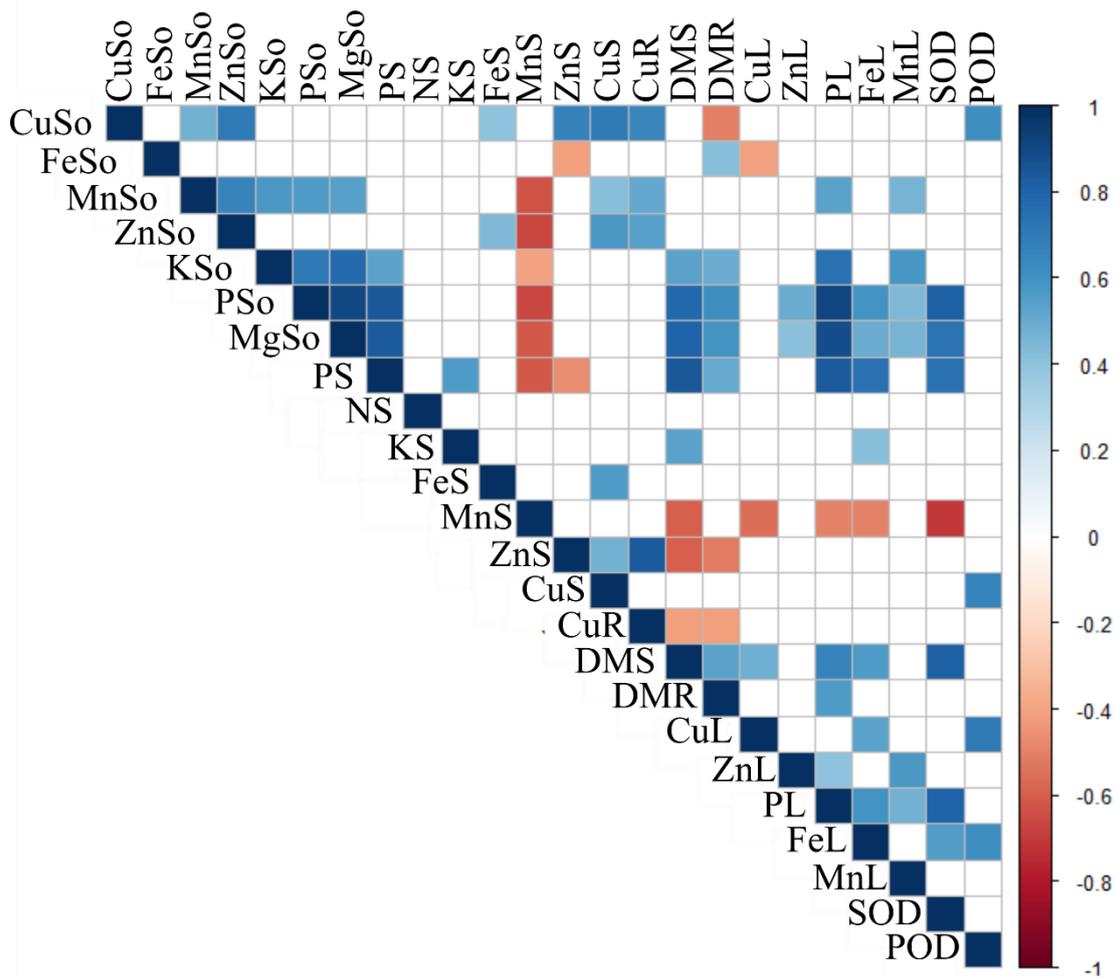


Figura 5. Matriz de correlação de *Spearman* considerando as variáveis da planta, do solo e do lixiviado e as doses de vermicomposto de 0, 5, 10, 20 e 40 ton ha⁻¹. Quadrantes em branco (não preenchidos) são não significativos.

Fonte: Elaborado pelos Autores

Discussão

A aveia preta é comumente utilizada como planta de cobertura de solo em vinhedos, inclusive como fitoestabilizadora de solos contaminados com cobre (Trentin et al. 2022). Porém, quando há excesso de Cu, pode ocorrer a redução da taxa fotossintética e alteração da atividade enzimática, o que resulta na inibição do crescimento, bem como em outros efeitos que podem levar a morte das plantas (Shabbir et al. 2020; Mir et al. 2021a). Teores acima de 30 mg Cu kg⁻¹, no tecido, podem provocar estresse fisiológico e dificultar o desenvolvimento das plantas (Kumar et al., 2021). De Conti et al. (2018) observaram que a partir do teor no solo de 31.5 mg kg⁻¹ de Cu (extraído por EDTA) as plantas de aveia preta reduziram o crescimento e a produção de massa seca.

As características do vermicomposto utilizado nesta pesquisa estavam dentro dos limites estabelecidos pelas entidades internacionais (Brinton 2000; CPHEEO 2016). Esse adubo orgânico já demonstrou potencial como amenizante do excesso de Cu no solo, principalmente em solos com pH ácido, baixos teores de matéria orgânica e arenosos (Santana et al. 2018; Ehiomogue 2023). Em estudo com aplicação de vermicomposto em solos ácidos, Liu et al. (2019) observaram a redução na disponibilidade de metais pesados. Wang et al. (2024) testaram a aplicação combinada de vermicomposto com resíduo siderúrgico em um solo ácido de mineração



por sulfeto de cobre e constataram que a mistura reduziu efetivamente a biodisponibilidade de Cu no solo, aumentando a efetividade da fitorremediação pelo acúmulo de cobre em *Lolium perene*.

No presente estudo foi demonstrado que o vermicomposto aumentou os teores de nutrientes no solo e promoveu maior crescimento das plantas, reduzindo os efeitos fitotóxicos do Cu, principalmente nas maiores doses (Figura 1; 20 e 40 ton ha⁻¹), onde a biomassa da planta foi maior do que na ausência do vermicomposto. Além disso, a menor atividade das enzimas SOD e POD nos tratamentos com menor dose demonstram que houve uma melhora nas defesas bioquímicas das plantas frente ao excesso de Cu. O aumento na quantidade de biomassa também resultou em aumento significativo no conteúdo total acumulado de Cu nos tecidos da aveia preta (massa seca x teor de Cu no tecido). Resultados semelhantes foram descritos por Silva et al. (2022a) em aveia preta cultivada em solos contaminados por metais pesados, sob adubação com dejetos suínos. Os autores observaram maior produção de biomassa e fitoextração de Cu, Zn, Ni e Pb, sem danos fitotóxicos à planta (Silva et al. 2022a).

A atividade de enzimas antioxidativas, como a SOD e a POD, aumentam proporcionalmente à elevação do teor de nutrientes no tecido das plantas, como observado nas maiores doses do vermicomposto (Figura 2; Shahkolaie et al. 2020). Porém, quando relacionado a biomassa da planta com a absorção de Cu é verificada uma relação proporcional entre reatividade destas enzimas e o teor de Cu acumulado. O acúmulo de Cu nas folhas caracteriza um estresse oxidativo pelo aumento da formação de espécies reativas de oxigênio, o que consequentemente desequilibra a produção de enzimas (Li et al. 2019b; Shahkolaie et al. 2020; Mir et al. 2021b). A SOD é a primeira enzima no processo de desintoxicação celular, pois converte rapidamente os radicais superóxidos em H₂O₂, que posteriormente são degradados pela atividade da POD (Shahkolaie et al. 2020; Schwalbert et al. 2021).

Nos tratamentos com as menores doses de vermicomposto as plantas apresentaram maiores teores de Mn e Zn na parte aérea, que reduziram significativamente conforme o aumento da dose (Material suplementar). O acúmulo destes metais pode indicar potenciais danos ao metabolismo da planta (De Conti et al. 2019; Zeng et al. 2019), que no presente estudo, foi corrigido pela adição do vermicomposto.

O uso de altas doses de vermicomposto (20 e 40 ton ha⁻¹), apesar de promover o crescimento da planta, aumentou a concentração de P, Cu, Zn, Mn e Fe no lixiviado (Figura 3). Isto indica que o uso desta quantidade de vermicomposto pode resultar em contaminação de águas subsuperficiais. Investigações sobre a lixiviação de metais pesados em solo arenosos são essenciais para avaliar a mobilidade destes elementos no perfil do solo, após a aplicação de amenizantes orgânicos (Fang et al. 2017). A ligação do cobre ou de moléculas contendo cobre ao C solúvel adicionados no solo pelo vermicomposto pode aumentar a lixiviação deste metal. Além disso, o solo que recebeu o vermicomposto tende a apresentar maior porosidade e condutividade hidráulica, o que resulta em maior lixiviação (Bagheri et al. 2021).

De acordo com a regulamentação brasileira, concentrações acima de 2,000 µg L⁻¹ de Cu indicam águas subterrâneas impróprias para o consumo humano (CONAMA 2008). Alguns valores verificados nesta investigação ultrapassam os limites estabelecidos, o que indicaria um potencial dano ambiental, porém mais estudos precisam ser realizados, especialmente considerando amostras de solo indeformadas, pois a manutenção da estrutura do solo tem influência direta no fluxo de água no solo e na lixiviação dos elementos químicos no perfil.

O aumento linear das doses de vermicomposto reflete no aumento da concentração de Cu no solo. Isto pode ser explicado pela elevada concentração deste metal no vermicomposto (131.5 mg kg⁻¹; Tabela 1). Os bovinos de leite costumam ter a dieta suplementada com Cu, Zn e Mn e esses elementos, em excesso, são eliminados nas fezes, vindo a compor o vermicomposto (Daniel et al. 2023). Cipoleta et al. (2019) verificaram



aumento da lixiviação de Cu, acima do limite preconizado pela legislação, nas maiores doses de leonardita, um tipo de húmus produzido a partir da turfa fossilizada. Filipović et al. (2023) correlacionaram altas concentrações de Cu em lixiviado de solos de vinhedos às altas concentrações de carbono orgânico dissolvido.

Os teores lixiviados de Zn, Fe e Mn (Figura 3) também aumentaram, de forma quadrática para Zn e Mn, e linear para Fe. Porém o Zn permaneceu dentro dos limites preconizados pela legislação. Para o Fe, Mn e Zn, a legislação brasileira de água subterrânea para consumo humano considera como limite de $300 \mu\text{g L}^{-1}$, $100 \mu\text{g L}^{-1}$ e $5,000 \mu\text{g L}^{-1}$, respectivamente (CONAMA 2008). Os valores de Fe observados (Figura 3E) foram superiores aos exigidos pela legislação brasileira, principalmente nas maiores doses de vermicomposto, atingindo o valor de $8,514 \mu\text{g L}^{-1}$. O valor de Mn observado aos 15 dias na dose de 40 ton ha^{-1} também superou o limite da legislação. O mesmo foi observado por Facco et al (2023), que verificaram que a adição de vermicomposto proporcionou aumento de Mn na solução do solo, quando comparado ao tratamento controle.

Observou-se que as maiores doses de vermicomposto tiveram uma maior lixiviação de P (Figura 6), demonstrando a impossibilidade do uso destas em solo arenoso. O excesso de P pode resultar no transporte de outros íons ligados ao fosfato a partir do escoamento superficial, ou pela percolação no perfil do solo (Jordán et al. 2020).

O vermicomposto em altas doses (20 ton ha^{-1} ou mais) promoveu maior crescimento da planta, mas resultou em aumento da lixiviação de nutrientes e metais pesados, o que indica que a melhor opção de amenizante para este tipo de solo é uma dose intermediária de vermicomposto, próximas a 10 ton ha^{-1} . Nesta dose verificou-se crescimento satisfatório da parte aérea e raiz da planta, acima do observado no tratamento com adubo mineral e acúmulo de Cu em raiz e parte aérea muito semelhante ao observado na maior dose de vermicomposto. Segundo Shrestha et al (2019) devido ao elevado risco de poluição de águas superficiais e subterrâneas decorrente da lixiviação de metais e nutrientes, o uso de compostos orgânicos para a fitorremediação deve considerar os efeitos no crescimento das plantas e, da mesma forma a concentração de nutrientes que podem ser lixiviados. O vermicomposto mesmo em doses baixas pode ser efetivo no crescimento da planta fitorremediadora em solos contaminados com Cu. Santana et al (2015) observaram que doses baixas de vermicomposto de bagaço de uva (equivalentes a 20 mg kg^{-1} de P) favoreceram a fitoestabilização de Cu por plantas de *Canavalia ensiformis* em solo arenoso.

Como observado no trabalho, a melhor dose de aplicação foi de 10 ton/ha , pois promoveu o crescimento da aveia preta sem causar lixiviação significativa dos componentes presentes no vermicomposto. Essa abordagem pode ser adotada em outros vinhedos ou em áreas similares às deste estudo.

Para estudos futuros, recomenda-se testar outros amenizantes associados ao vermicomposto, como o biocarvão, por exemplo, analisando não apenas a mistura entre os dois, mas também as doses ideais e a associação com fungos micorrízicos arbusculares. Além disso, pesquisas em campo são recomendadas para validar os resultados em condições reais e avaliar os efeitos a longo prazo. Estudos envolvendo o uso de outras espécies vegetais com potencial fitorremediador também são recomendados.

Conclusão

A dose de vermicomposto de 10 ton ha^{-1} constitui-se em uma estratégia de aumento da produção de biomassa da aveia preta em programas de fitorremediação de solos arenosos contaminados com cobre. Além disso, não resulta em elevadas lixiviações de nutrientes e metais pesados no perfil do solo. Já doses de vermicomposto maiores que 20 ton ha^{-1} apesar de propiciarem um crescimento ainda maior das plantas de aveia preta, resultam em elevadas lixiviações de cobre, zinco, manganês e fósforo no perfil do solo, e não devem ser utilizadas na fitorremediação de solos arenosos.



Referências

- Bagheri H, Zare Abyaneh H, Izady A 2021. Nutrient and colloid leaching from un-amended versus vermicompost-amended soil. *Soil and Tillage Research* 213: 105092. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105092>
- Beauchamp C, Fridovich, I 1971. Superoxide Dismutase: Improved Assays and an Assay Applicable to Acrylamide Gels. *Analytical Biochemistry* 44: 276-287. [http://dx.doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](http://dx.doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8)
- Brasil 2020. Instrução Normativa No 61, de 08 de julho de 2020. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura.
- Bremner JM, Mulvaney, CS 1982. Nitrogen-Total. In: *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*, Page, A.L., Miller, R.H. & Keeney, D.R. Eds., American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 595-624.
- Brinton WF 2000. Compost quality standards and guidelines, Final Report by Woods End Research Laboratories for the New York State Association of Recyclers.
- Brunetto G, Marques ACR, Trentin E, Sete PB, Soares CRFS, Ferreira PAA, Melo GWB, Zalamena J, da Silva LOS, Marchezan C, da Silva ICB, dos Santos JPJ, Morsch L 2023. Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation as strategy to mitigate copper toxicity in young field-grown vines. *Ciência e Técnica Vitivinícola* 38: 60-66. <https://doi.org/10.1051/ctv/ctv20233801060>
- Campillo-Cora C, Fernández-Calviño D, Pérez-Rodríguez P, Fernández-Sanjurjo MJ, Núñez-Delgado A, Álvarez-Rodríguez E, Arias-Estévez M, Nóvoa-Muñoz JC 2019. Copper and zinc in rhizospheric soil of wild plants growing in long-term acid vineyard soils. Insights on availability and metal remediation. *Science of The Total Environment* 672: 389-99. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.301>
- Chance B, Maehly AC 1955. Assay of Catalase and Peroxidase. *Methods in Enzymology* 2: 764-775. [http://dx.doi.org/10.1016/S0076-6879\(55\)02300-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0076-6879(55)02300-8)
- Chileshe MN, Syampungani S, Sandell Festin E, Tigabu M, Daneshvar A, Odén PC 2020. Physico-chemical characteristics and heavy metal concentrations of copper mine wastes in Zambia: implications for pollution risk and restoration. *Journal of Forestry Research* 31(4): 1283-1293. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00921-0>
- Cipoleta NS, Simões da Silva LF, Lopes-Assad MLRC 2019. Use of organic materials to attenuate copper contamination of Bordeaux mixture. *Ambiência* 15(2): 289-307.
- CONAMA 2008. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. *Diário Oficial da União* 66: 64-68.
- Covre WP, Carvalho CS, Campos ML, Rodrigues MTL, Silva CF, Fernandes AR, Alleoni LRF. 2022. Impact of copper mining wastes in the Amazon: Properties and risks to environment and human health. *Journal of Hazardous Materials* 421: 126688. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126688>



Comissão de Química e Fertilidade do Solo (CQFS). 2016. *Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*, 11. ed., Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo-Núcleo Regional Sul, 376 p.

CPHEEO 2016. *Municipal Solid Waste Management Manual Part II: The manual*, Central Public Health and Environmental Engineering Organisation (CPHEEO) Ministry of Urban Development.

Daniel JB, Brugger D, van der Drift S, van der Merwe D, Kendall N, Windisch W, Doelman J, Martín-Tereso J 2023. Zinc, copper, and manganese homeostasis and potential trace metal accumulation in dairy cows: longitudinal study from late lactation to subsequent mid-lactation. *The Journal of Nutrition* 153(4): 1008-1018. <https://doi.org/10.1016/j.tjn.2023.02.022>.

De Conti L, Ceretta CA, Tiecher TL, da Silva LOS, Tassinari A, Somavilla LM, Mimmo T, Cesco S, Brunetto G 2018. Growth and chemical changes in the rhizosphere of black oat (*Avena strigosa*) grown in soils contaminated with copper. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 163: 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.045>.

De Conti L, Ceretta CA, Melo GWB, Tiecher TL, Silva LOS, Garlet LP, Mimmo T, Cesco S, Brunetto 2019. Intercropping of young grapevines with native grasses for phytoremediation of Cu-contaminated soils. *Chemosphere* 216: 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.134>.

Ehiomogbe P 2023. Vermicompost remediation of contaminated soil: a mini review. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering* 21(3): 153-160.

Facco DB, Trentin E, Drescher GL, Hammerschmitt RK, Ceretta CA, da Silva LS, Brunetto G, Ferreira PAA 2023. Chemical speciation of copper and manganese in soil solution and young grapevine growth in copper contaminated soil with amendment application. *Pedosphere* 33(3): 496-507. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.060>.

Fang W, Delapp RC, Kosson DS, van der Sloot HA, Liu J 2017. Release of heavy metals during long-term land application of sewage sludge compost: Percolation leaching tests with repeated additions of compost. *Chemosphere* 169: 271-280. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.086>.

Filipović L, Defterdarović J, Chen R, Krevh V, Gerke HH, Baumgartl T, Kovač Z, Ondrašek G, Ružičić S, He H, Dusek J, Filipović V 2023. Leached copper correlation with dissolved organic carbon in sloped vineyard soil. *Water* 15(4): 800. <https://doi.org/10.3390/w15040800>.

Giannopolitis CN, Ries SK 1977. Superoxide dismutase I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology* 59: 309-314.

Hamedi A, Zarabi M, Mahdavi S 2021. Comparative study on the effect of common ions on Zn²⁺ and Cu²⁺ adsorption by cattle manure vermicompost (VC) and VC-amended soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 52(22): 2821-2836. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1966438>



IUSS Working Group WRB. 2015. *World reference base for soil resources 2014, update 2015: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. <https://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf>

Jordán MM, Almendro-Candel MB, Navarro-Pedreño J, Pardo F, García-Sánchez E, Bech J 2020. Bioavailability, mobility and leaching of phosphorus in a Mediterranean agricultural soil (ne Spain) amended with different doses of biosolids. *Environmental Geochemistry and Health*: 1-8. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00772-3>

Kumar V, Pandita S, Sidhu GPS, Sharma A, Khanna K, Kaur P, Bali AS, Setia R 2021. Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: a comprehensive review. *Chemosphere* 262: 127810. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127810>

Li Q, Chen H-H, Qi Y-P, Ye X, Yang L-T, Huang Z-R, Chen L-S 2019. Excess copper effects on growth, uptake of water and nutrients, carbohydrates, and PSII photochemistry revealed by OJIP transients in Citrus seedlings. *Environmental Science and Pollution Research* 26(29): 30188-30205. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06170-2>

Liu B, Wu C, Pan P, Fu Y, He Z, Wu L, Li Q 2019. Remediation effectiveness of vermicompost for a potentially toxic metal-contaminated tropical acidic soil in China. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 182: 109394. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109394>

Marques ACR, Tiecher TL, Brunetto G, Vendruscolo D, De Conti L, Ambrosini VG, Miotto A, Rosa DJ, Silva ICB, Trentin E, Ferreira PAA, Jacques RJS, Pescador R, Comin JJ, Ceretta CAC, Melo GWB, Parent L-É 2023. Phytoremediation of Cu-contaminated vineyard soils in Brazil: A compendium of Brazilian pot studies. *Journal of Environmental Quality* 52(5): 1024-1036. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20503>

Miotto A, Ceretta CAC, Girotto E, Trentin G, Kaminski J, De Conti L, Moreno T, Elena B, Brunetto G 2017. Copper accumulation and availability in sandy, acid, vineyard soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 48(10): 1167-1183. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1341908>

Mir AR, Pichtel J, Hayat S 2021a. Copper: uptake, toxicity and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil. *Biometals* 34(4): 737-759. <https://doi.org/10.1007/s10534-021-00306-z>

Mir AR, Alam P, Hayat S 2021b. Effect of different levels of soil applied copper on the morpho-physiological, photochemical, and antioxidant system of *Brassica juncea*. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 21: 3477-3492.

Morsch L, Marques ACR, Trentin E, Oliveira FN, Andreolli T, Barbosa JGP, Ferreira MM, Moura-Bueno JM, Comin JJ, Loss A, Lourenzi CR, Brunetto G 2024. Diversity and botanical composition of native species in the Pampa biome in vineyards cultivated on soils with high levels of copper, zinc and manganese and phytoremediation potential. *Chemosphere* 349: 140819. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140819>

Murphy J, Riley JPA 1962. Modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27: 31-36.



Rangel TS, Santana NA, Jacques RJS, Ramos RF, Scheid DL, Koppe E, Tabaldi LA, Silveira AO 2023. Organic fertilization and mycorrhization increase copper phytoremediation by *Canavalia ensiformis* in a sandy soil. *Environmental Science & Pollution Research* 30(26): 68271-68289. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27126-7>

R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available online at: <http://www.r-project.org/>

Santana NA, Ferreira PAA, Soriani HH, Brunetto G, Nicoloso FT, Antonioli ZI, Jacques RJS 2015. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and vermicompost on copper phytoremediation in a sandy soil. *Applied Soil Ecology* 96: 172-182. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.08.001>

Santana NA, Rabuscke CM, Soares VB, Soriani HH, Nicoloso FT, Jacques RJS 2018. Vermicompost dose and mycorrhization determine the efficiency of copper phytoremediation by *Canavalia ensiformis*. *Environmental Science and Pollution Research* 25: 12663-12677. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1533-1>

Schwalbert R, Stefanello LO, Schwalbert RA, Tarouco CP, Drescher GL, Trentin E, Tassinari A, Silva IB da, Brunetto G, Nicoloso FT 2021. Soil tillage affects soybean growth and promotes heavy metal accumulation in seeds. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 216: 112191. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112191>

Shabbir Z, Sardar A, Shabbir A, Abbas G, Shamshad S, Khalid S, Natasha, Murtaza G, Dumat C, Shahid M 2020. Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment. *Chemosphere* 259: 127436. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127436>

Shahkolaie SS, Baranimotlagh M, Dordipour E, Khormali F 2020. Effects of inorganic & organic amendments on physiological parameters and antioxidant enzymes activities in *Zea mays* L. from a cadmium-contaminated calcareous soil. *South African Journal of Botany* 128: 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.10.007>

Shrestha P, Bellitürk K, Görres JH 2019. Phytoremediation of heavy metal-contaminated soil by switchgrass: A comparative study utilizing different composts and coir fiber on pollution remediation, plant productivity, & nutrient leaching. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 6(7): 1261. <https://doi.org/10.3390/ijerph16071261>

Silva JAF, García AC, Lima AS, Souza CCB, Amaral Sobrinho NMB 2022a. Effect of short-term pig slurry amendment of soil on humified organic matter and its relationship with the dynamics of heavy metals and metals uptake by plants. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 57(11): 958-969. <https://doi.org/10.1080/10934529.2022.2132795>

Silva ICB, Marques ACR., Quadros FF, Sans G, Soares VM, De Conti L, Ceretta CA, Ferreira PAA, Toselli M, Brunetto G 2022b. Spatial variation of herbaceous cover species community in Cu-contaminated vineyards in Pampa biome. *Environmental Science and Pollution Research* 27: 13348-13359. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21738-1>

Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira W G 2017. Manual de métodos de análise de solo.

Trentin E, Cesco S, Pii Y, Valentinuzzi F, Celletti S, Feil SB, Alzate Zuluaga MY, Ferreira PAA, Ricachenevsky FK, Stefanello LO, De Conti L, Brunetto G, Mimmo T 2022. Plant species and pH dependent responses to



copper toxicity. *Environmental and Experimental Botany* 196: 104791.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104791>

Vione EL, Silva LS, Cargnelutti Filho A, Aita NT, de Freitas de Moraes A, Kokkonen da Silva AA 2018. Caracterização química de compostos e vermicompostos produzidos com casca de arroz e dejetos animais. *Revista Ceres* 65: 65-73.

Wang Y, Xu YA, Li D, Tang BC, Man SL, Jia YF, Xu H 2018. Vermicompost and biochar as bio-conditioners to immobilize heavy metal & improve soil fertility on cadmium contaminated soil under acid rain stress. *Science of the Total Environment* 621: 1057-1065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.121>

Wang X, Xue J, He M, Qi H, Wang S2024. The effects of vermicompost and steel slag amendments on the physicochemical properties and bacterial community structure of acidic soil containing copper sulfide mines. *Applied Sciences* 14(3): 1289. <https://doi.org/10.3390/app14031289>

Zeng Q, Ling Q, Wu J, Yang Z, Liu R, Qi Y 2019. Excess copper-induced changes in antioxidative enzyme activity, mineral nutrient uptake and translocation in sugarcane seedlings. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 103(6): 834-840. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02735-6>

Zeraik AE, Souza FS, Fatibello-Filho O, Leite OD 2008. Desenvolvimento de um spot test para o monitoramento da atividade da peroxidase em um procedimento de purificação. *Química Nova* 31: 731-734. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000400003>