

Artigos

Crescimento e tolerância de mudas de *Ilex paraguariensis* A.St.-Hil. cultivadas em solo contaminado com cobre

Growth and tolerance of *Ilex paraguariensis* A.St.-Hil. seedlings grown in copper-contaminated soil

Antônio Marcos Zuliani Lunkes^I 
Nilton César Mantovani^{II} 
Hilda Hildebrand Soriani^{II} 
Fabio Santos Rangel Junior^{III} 

^IUniversidade Federal de Santa Maria, Palmeira das Missões, RS, Brasil

^{II}Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, RS, Brasil

^{III}Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil

RESUMO

O cobre (Cu) é um micronutriente necessário ao desenvolvimento das plantas, pois está incluído na estrutura de compostos enzimáticos e ativadores. Contudo, em altas concentrações no solo pode se tornar tóxico ao metabolismo vegetal. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o crescimento e tolerância de mudas de *Ilex paraguariensis* cultivadas em solo contaminado com cobre. O estudo foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Campus de Frederico Westphalen, RS, entre os meses de março e setembro de 2018. As mudas de *Ilex paraguariensis* utilizadas no experimento foram adquiridas de um viveiro localizado no município de Arvorezinha, RS. Os tratamentos aplicados foram cinco doses de Cu (0 - controle, sem adição de cobre; 100; 200; 300 e 400 mg Kg⁻¹ de solo). O experimento foi implantado em delineamento inteiramente casualizado com 10 repetições, sendo cada repetição uma planta por vaso. Após a exposição aos diferentes tratamentos, sob cultivo em solo aos 150 dias, avaliou-se a altura de planta, diâmetro do caule, área foliar, massa seca de raiz, caule e folhas e índice de tolerância. Os resultados evidenciaram que as doses de cobre reduziram a altura e diâmetro de caule das mudas. A massa seca de todas as partições coletadas mostrou redução a partir da utilização de 200 mg kg⁻¹ de solo. As plantas submetidas a maior dose de Cu (400 mg kg⁻¹ de solo) apresentaram redução na área foliar de 64,7% em relação à testemunha. A espécie *Ilex paraguariensis* apresentou o índice de tolerância superior a 60% até a dose de 300 mg kg⁻¹ de Cu.

Palavras-chave: Erva-mate; Metal pesado; Micronutriente; Toxicidade

ABSTRACT

Copper (Cu) is a micronutrient necessary for plant development, as it is included in the structure of enzymatic compounds and activators. However, at high soil concentrations it can become toxic to plant metabolism. Thus, the objective of this work was to evaluate the growth and tolerance of *Ilex paraguariensis* seedlings grown in copper contaminated soil. The study was conducted in a greenhouse of the Department of Forestry Engineering, Federal University of Santa Maria, Campus Frederico Westphalen, RS, between March and September 2018. The seedlings of *Ilex paraguariensis* used in the experiment were acquired from a nursery located in the municipality of Arvorezinha, RS. The treatments applied were five doses of Cu (0 - control, without addition of copper; 100; 200; 300 and 400 mg Kg⁻¹ of soil). The experiment was carried out in a completely randomized design with 10 replications, each repetition being one plant per pot. After exposure to different treatments under soil cultivation at 150 days, plant height, stem diameter, leaf area, root, stem and leaf dry mass and tolerance index were evaluated. The results showed that the copper doses reduced the seedlings height and stem diameter. The dry mass of all collected partitions showed reduction from the use of 200 mg kg⁻¹ of soil. The plants submitted to higher Cu (400 mg kg⁻¹ soil) showed a reduction in leaf area of 64.7% in relation to the control. The species *Ilex paraguariensis* presented a tolerance index higher than 60% up to 300 mg kg⁻¹ Cu.

Keywords: Mate herb; Heavy metal; Micronutrient; Toxicity

1 INTRODUÇÃO

Embora os metais pesados estejam naturalmente presentes no solo, atividades antropogênicas, como a agricultura, urbanização, industrialização e mineração contribuem para o aumento da concentração desses elementos (CHIBUIKE; OBIORA, 2014). Estudos feitos comprovam que essas atividades antropogênicas são as principais fontes de contaminação por metais pesados (ALLOWAY, 2013; BROADLEY *et al.*, 2012; DE MARCO *et al.*, 2017; WEI; YANG, 2010). Contudo, a presença de alguns elementos classificados como metais pesados no ambiente é muito importante, pois são micronutrientes de plantas e/ou animais (KABATA-PENDIAS, 2011). Esses elementos possuem funções específicas nas rotas metabólicas das quais participam, não podendo ser substituídos por outros com propriedades similares (YRUELA, 2013).

Dentre esses metais pesados, o cobre (Cu), um micronutriente, constitui várias enzimas “chave” e, também, desempenha funções importantes em processos fisiológicos de plantas, tais como: fotossíntese, respiração, metabolismo de

carboidratos e de nitrogênio, reprodução e resistência a doenças (KABATA-PENDIAS, 2011). A maioria das funções do Cu, como um micronutriente de plantas, é baseada em Cu ligado enzimaticamente que catalisa as reações de oxidação e redução (BROADLEY *et al.*, 2012). A concentração de Cu em plantas é, em geral, pequena, variando entre 2 a 20 mg kg⁻¹ na matéria seca (MS), no entanto, concentrações entre 20 a 100 mg kg⁻¹ na MS da parte aérea são consideradas tóxicas para algumas espécies, como citros e leguminosas (KABATA-PENDIAS, 2011). Altas concentrações de Cu na solução do solo podem levar ao acúmulo em tecidos vegetais, ocorrendo em condições naturais ou então, devido às atividades antropogênicas (BROADLEY *et al.*, 2012).

O acúmulo de Cu pode levar a alterações anatômicas, morfológicas e fisiológicas, como danos às raízes, inibição da absorção de nutrientes e água, redução das taxas de fotossíntese e crescimento das plantas (CAMBROLLÉ *et al.*, 2015; LEQUEUX *et al.*, 2010; TOSELLI *et al.*, 2009). Os sintomas de toxicidade causados pelo excesso de Cu podem variar entre as espécies e genótipos da mesma espécie (YRUELA, 2009). Contudo, geralmente se observa redução no crescimento das raízes, evidenciando ramificações anormais, espessamento, coloração escura e redução do alongamento (AMBROSINI *et al.*, 2015). O uso contínuo de fungicidas à base de Cu adicionou grandes quantidades deste elemento químico ao solo no cultivo de videira, por exemplo, causando redução na produtividade das plantas (BROADLEY *et al.*, 2012; FERREIRA *et al.*, 2015).

Os sintomas tóxicos de Cu para a espécie *Ilex paraguariensis* A.St.-Hil., popularmente conhecida como erva-mate, pertencente à família Aquifoliaceae, são ainda desconhecidos. A erva-mate ocorre naturalmente na Argentina, Bolívia, Brasil, Paraguai e Uruguai (SOBRAL; JARENKOW, 2013), em formações florestais associadas com o pinheiro-do-paraná (*Araucaria angustifolia*) (STURION; RESENDE, 2010). Esta é uma espécie que varia de arvoreta a árvore perenifolia de grande importância socioeconômica, ambiental e cultural para a região Sul do Brasil (CHECHI; SCHULTZ, 2016), integrando um dos sistemas agroflorestais mais importantes do Brasil, sendo uma das espécies que concorre para a manutenção do pequeno produtor no meio rural

(STURION; RESENDE, 2010). Pela industrialização de suas folhas e ramos finos, obtêm-se diferentes produtos destinados à preparação de bebidas tônicas e estimulantes tais como o chimarrão, o tererê e também o chá-mate (VIDOR *et al.*, 2002).

O consumo da infusão de erva-mate apresenta efeitos benéficos à saúde humana, pois atua na proteção dos sistemas biológicos do estresse oxidativo, além de ações anti-inflamatórias, antiobesidades, anticancerígenas e cardioprotetoras (FAGUNDES *et al.*, 2015; MATEOS *et al.*, 2018; PIMENTEL *et al.*, 2013). Esses benefícios estão relacionados aos compostos fenólicos, que atuam como antioxidantes (MATEOS *et al.*, 2018). Além destes, a espécie sintetiza metilxantinas, como a cafeína, teobromina e teofilina, que estimulam o sistema nervoso central (DUTRA; HOFFMANN-RIBANI, 2010). Por estes motivos, o emprego da erva-mate tem se expandido para a indústria farmacêutica, alimentícia e também de cosméticos (STURION; RESENDE, 2010). No entanto, a literatura não relata a influência da contaminação do solo com cobre sobre o crescimento de mudas de *Ilex paraguariensis*. Nesse sentido, uma questão ainda persiste sobre a possibilidade da erva-mate crescer e ser tolerante a solo contaminado com Cu. Desse modo, este trabalho objetivou avaliar o crescimento e a tolerância de mudas de *Ilex paraguariensis* cultivadas em solo contaminado com cobre sob condições controladas de casa de vegetação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material vegetal e condições experimentais

Este trabalho foi realizado em casa de vegetação climatizada, pertencente ao Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), *Campus* de Frederico Westphalen (27°23'46" S; 53°25'41" O), Rio Grande do Sul, Brasil, entre os meses de março e setembro de 2018. A casa de vegetação é revestida de polipropileno transparente (150 micras) e internamente apresenta cobertura de tela de sombreamento que intercepta 50% da luz. A temperatura do ambiente na casa de

vegetação foi mantida em 25 °C (± 2 °C) e a umidade do ar em torno de 65 % (± 5 %), através de sistema automatizado de resfriamento, aquecimento e nebulização.

O solo utilizado no experimento foi classificado como Latossolo Vermelho (STRECK *et al.*, 2008), coletado em área agrícola do *campus* da UFSM, na camada de 0-20 cm de profundidade, conforme metodologia de Bissani *et al.* (2008), cujos resultados da caracterização química e física estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização química e física do solo utilizado no experimento em casa de vegetação em Frederico Westphalen, RS, UFSM, 2018

pH água (1:1)	Ca + Mg	Al	H + Al	P	K	Cu	MO	Argila
	Cmol _c /L			mg/L			%	
4,8	4,6	1,1	8,7	30,8	251,7	10,3	3,9	58

Fonte: Autores (2018)

As plantas de erva-mate utilizadas no experimento, adquiridas de um viveiro localizado no município de Arvorezinha, RS, foram produzidas a partir de sementes e cultivadas em tubetes contendo substrato constituído de areia, vermiculita, casca de arroz carbonizada e solo do tipo latossolo vermelho. Conforme informação do produtor, as plantas não foram adubadas até o momento da aquisição. As plantas com 6-8 meses de idade foram padronizadas quanto ao tamanho (altura e diâmetro) e número de folhas.

As unidades experimentais foram compostas por vasos de plástico com capacidade de 6 litros, contendo, individualmente, uma planta de erva-mate. O experimento foi conduzido por 150 dias após o transplante das mudas. Foram realizadas seis adubações de NPK (formulação 15:30:15), 10 g L⁻¹ com aplicação de 100 mL da solução por vaso (1 g/vaso), sendo a primeira aos 60 dias após o plantio das mudas e as demais aplicadas quinzenalmente. As adubações foram necessárias, pois o solo utilizado foi um solo pobre nutricionalmente e que não foi corrigido, assim, para que não houvesse estresse pela deficiência de nutrientes, optou-se pela adubação quinzenal na forma líquida.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado com 5 (cinco) tratamentos compostos de doses de cobre, sendo: 0 (controle, sem adição de cobre); 100; 200; 300 e 400 mg Kg⁻¹ de solo, com 10 (dez) repetições por tratamento, sendo cada repetição constituída por uma planta por vaso. As doses de cobre utilizadas foram baseadas em experimentos prévios com videira (*Vitis vinifera*) e milho (*Zea mays*) em solo arenoso (TIECHER *et al.*, 2016; TIECHER *et al.*, 2017a).

As doses de cobre, na forma de solução de sulfato de cobre (CuSO₄·5H₂O), foram aplicadas ao solo dos vasos 30 dias antes do transplante das mudas, com as quantidades equivalentes de CuSO₄·5H₂O para atingir as concentrações de 100, 200, 300 e 400 mg Kg⁻¹ de solo, respectivamente de 1,97; 3,94; 5,91 e 7,88 g. O sulfato de cobre utilizado na contaminação do solo de cada vaso foi diluído em 50 mL de água destilada e, nos trinta dias subsequentes, houve a homogeneização do solo assim como sua umidificação.

2.2 Avaliações

O acompanhamento do experimento foi realizado semanalmente, com a realização das medições de altura da parte aérea (AP) e diâmetro do caule (DC) a cada 30 dias. As avaliações de altura da parte aérea (em cm) foram obtidas com régua graduada a partir do colo das plantas até o ápice caulinar. O diâmetro do caule (em mm) foi obtido com paquímetro digital na região do colo da planta. Na análise da área foliar (AF), quantificada em dm², foram utilizadas cinco plantas por tratamento, tomando-se 100% das folhas completamente expandidas, utilizando-se um integrador de área foliar (AM 300, ADC Bio Scientific LTd.). O aparelho é composto de uma prancheta e um pequeno *scanner* de mão acoplado a um microcomputador, fornecendo os valores de área diretamente.

Para determinação da massa seca do sistema radicular (MSR), do caule (MSC) e das folhas (MSF) em gramas, foram coletados separadamente todos os materiais e, posteriormente, acondicionados em sacos de papel devidamente identificados

para secagem em estufa de ar forçado a 60 °C (± 1 °C) até massa constante. Após a secagem, o material foi pesado em balança analítica para quantificar a distribuição de biomassa nas partes da planta (raízes, caules e folhas). A massa seca total (MST) foi obtida pela fórmula: $MST = MSR + MSC + MSF$.

Calculou-se também o índice de tolerância (IT) e o percentual de redução (PR %). O índice de tolerância (IT) foi calculado pela fórmula: $[(MST \text{ contaminado} / MST \text{ controle}) \times 100]$, sendo MST contaminado, a massa seca total da muda crescida em solo contaminado e MST controle, a massa seca total da muda crescida no controle sem adição de Cu (ZACCHINI *et al.*, 2009). O percentual de redução (PR %) da altura, do diâmetro, da massa seca e da área foliar das plantas tratadas com a maior dose de cobre (400 mg Kg⁻¹ de solo) obteve-se comparando com a dose zero (controle, sem adição de cobre), sendo calculado pela fórmula: $((\text{dose } 400 / \text{dose } 0) - 1) \times 100$.

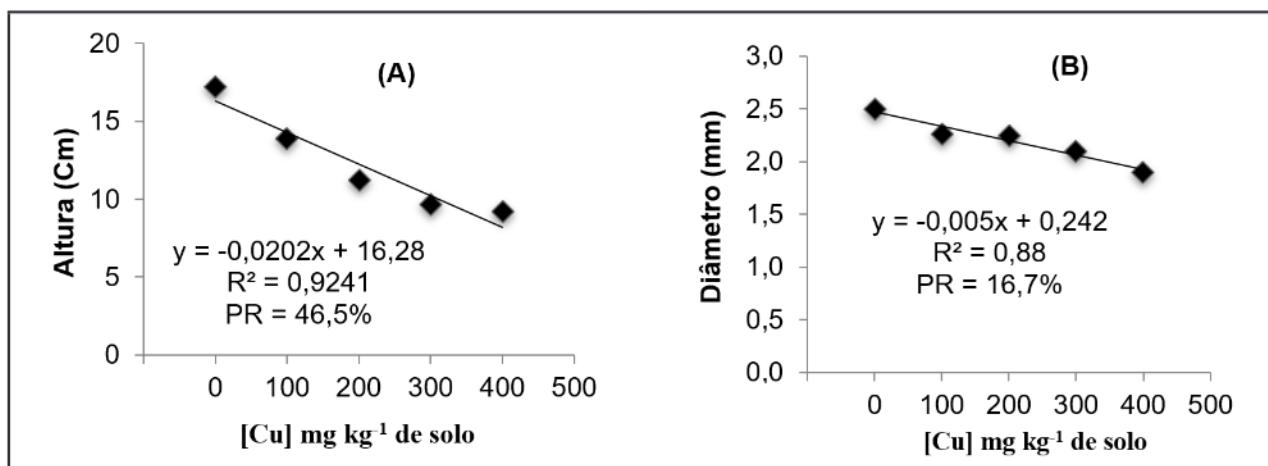
2.3 Análise estatística dos dados

Foram verificadas a normalidade da distribuição dos erros através do teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade das variâncias dos erros através do teste de Bartlett (STORCK *et al.*, 2011) para todas as variáveis do experimento. Quando atendidos estes pressupostos, procedeu-se a análise de variância e ajuste de regressões para os tratamentos a 5% de probabilidade de erro, através do programa estatístico Sisvar (FERREIRA, 2011). Os resultados do índice de tolerância, por serem relativos ao controle, foram comparados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro ($p \leq 0,05$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de regressão revelou alterações significativas ($p \leq 0,05$) nos parâmetros avaliados em função das doses de cobre aplicadas (Figura 1). Observou-se redução na altura (cm) e no diâmetro (mm) do caule das plantas de *Ilex paraguariensis*, respectivamente, de 46,5 e 16,7% na maior dose de Cobre em relação à dose zero (sem adição de cobre), (Figuras 1A e 1B).

Figura 1 – Altura (A) e diâmetro do caule (B) de plantas de *Ilex paraguariensis* submetidas a doses de cobre no solo em Frederico Westphalen, RS, no ano de 2018



Fonte: Autores (2018)

Em que: *PR = Percentual de redução da maior dose em relação à dose zero.

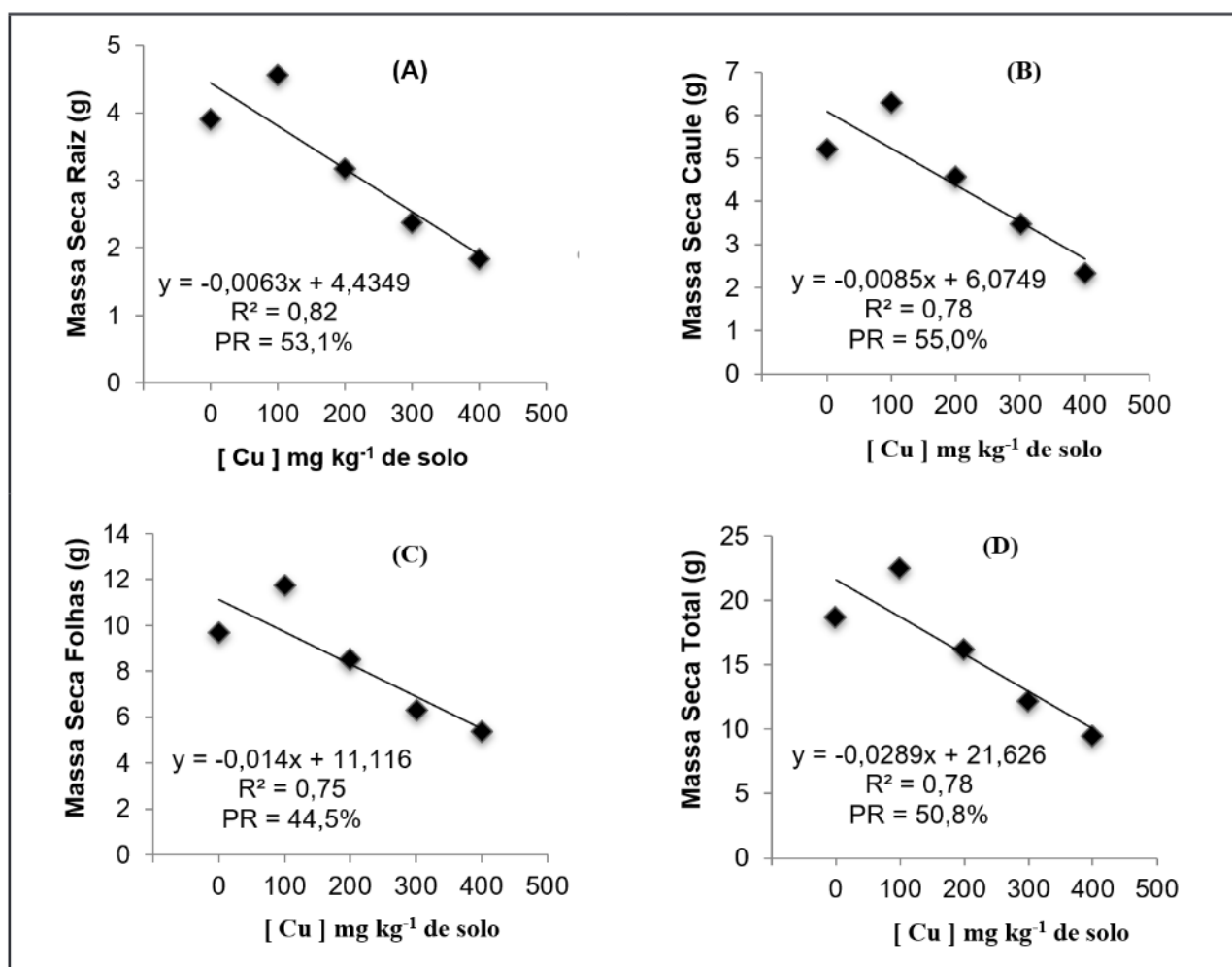
Estudos com espécies arbóreas também comprovam a diminuição da altura e do diâmetro do caule em função do aumento das doses de Cu (DELLAI *et al.*, 2018; DE MARCO *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2014). O excesso de Cu pode causar distúrbios no crescimento e desenvolvimento normal das plantas, afetando negativamente importantes processos fisiológicos e bioquímicos, como a permeabilidade da membrana plasmática, a síntese de proteínas, a estrutura da cromatina, a atividade de enzimas nos processos de fotossíntese e respiração (AMBROSINI *et al.*, 2016; YRUELA, 2009). Desse modo, verificou-se que estas alterações ocorreram culminando na redução dos parâmetros de altura da parte aérea e diâmetro do caule das plantas de *Ilex paraguariensis*.

A massa seca de raiz, caule e folhas da espécie *Ilex paraguariensis* foi influenciada significativamente pelas doses de cobre no solo (Figura 2), tendo o tratamento correspondente a 100 mg kg⁻¹ proporcionado um aumento de 16,9, 20,8 e 21,5%, respectivamente, em relação à testemunha (Figura 2A, 2B e 2C). Esse acréscimo verificado em doses mais baixas é devido ao elemento cobre ser um micronutriente à planta, portanto, em baixas concentrações no solo acaba por favorecer o desenvolvimento,

pois o cobre faz parte de vários compostos orgânicos, como proteínas e enzimas vitais ao metabolismo vegetal, atuando no controle da síntese de DNA e RNA, e participando de vários processos fisiológicos, como fotossíntese, respiração e metabolismo de carboidratos, lipídeos e do nitrogênio (KABATA-PENDIAS, 2011; BROADLEY *et al.*, 2012).

A partir da utilização de 200 mg kg⁻¹ de Cu, a biomassa diminuiu de forma linear, sinalizando um efeito prejudicial de Cu no crescimento das plantas de erva-mate (Figura 2D).

Figura 2 – Massa seca de raiz (A), massa seca do caule (B), massa seca de folhas (C) e massa seca total (D) de plantas de *Ilex paraguariensis* submetidas a doses de cobre no solo em Frederico Westphalen, RS, no ano de 2018



Fonte: Autores (2018)

Em que: *PR = Percentual de redução da maior dose em relação à dose zero.

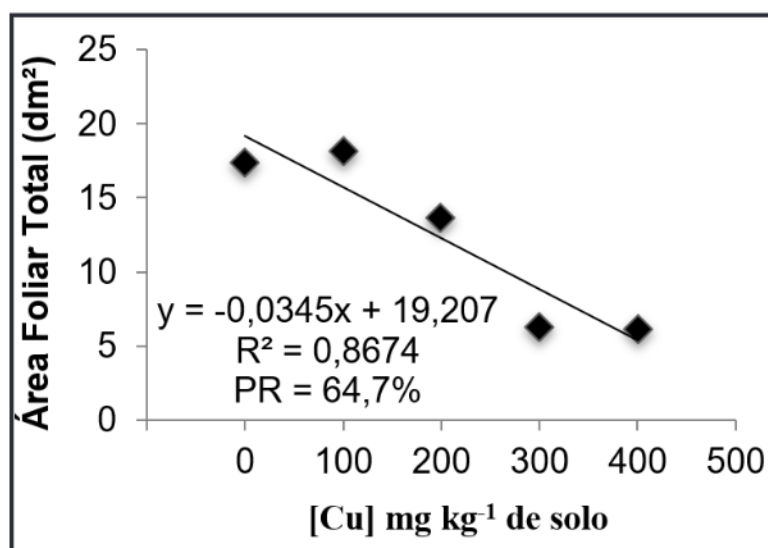
Chaves *et al.* (2010) observaram redução na biomassa seca das plantas de mamoneira (*Ricinus communis* L.) em função do incremento de Cu. De Marco *et al.* (2017) também evidenciaram diminuição na matéria seca das mudas de *Eucalyptus grandis* com o aumento das doses de Cu no solo. Plantas cultivadas em solo com altos níveis de cobre, normalmente, apresentam redução na produção de biomassa, sintomas de clorose na parte aérea e desenvolvimento anormal das raízes (AMBROSINI *et al.*, 2016). Além disso, o excesso de Cu pode causar alterações no metabolismo do nitrogênio (N), reduzindo a atividade de enzimas de fixação e assimilação deste nutriente, especialmente nas raízes, diminuindo os níveis de N total na planta, nitrato e aminoácidos livres (TIECHER *et al.*, 2017b). Desse modo, verificou-se que a erva-mate tem sua atividade enzimática afetada a partir de 200 mg kg⁻¹ de Cu no solo.

As doses de cobre influenciaram significativamente a área foliar das plantas de *Ilex paraguariensis* (Figura 3). Observou-se os maiores valores de 18,14 dm² de área foliar na dose de 100 mg kg⁻¹ de Cu no solo. A partir da utilização de 200 mg kg⁻¹ de Cu, a área foliar diminuiu de forma linear, sendo o mesmo apresentado pela variável massa seca. As plantas submetidas a maior dose de Cu, 400 mg kg⁻¹ de solo, apresentaram redução na área foliar de 64,7% em relação à testemunha.

De acordo com Broadley *et al.* (2012), o cobre é um elemento requerido para o bom desenvolvimento das plantas, pois participa intensivamente do metabolismo de carboidratos e de nitrogênio, da síntese de lignina e da clorofila. Contudo, altas concentrações de Cu na solução do solo podem causar toxicidade às plantas, apresentando sintomas de clorose, necrose, inibição do crescimento das raízes e folhas e distúrbios na estrutura das proteínas (YRUELA, 2009). Nesse sentido, Silva *et al.* (2016) evidenciaram que conforme o aumento de Cu no solo, reduz a altura de plantas, massa seca da parte aérea e radicular e área superficial específica de mudas das espécies pata-de-vaca (*Bauhinia forficata* Link) e carne-de-vaca (*Pterogyne nitens*

Tul.). Marques *et al.* (2018) também observaram diminuição no teor de clorofila para as espécies de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), canafístula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.) e óleo-balsamo (*Myroxylon peruiferum* L. F.) com aumento das doses de Cu no solo. Desse modo, é possível que o cobre adicionado ao solo, a partir de 200 mg kg⁻¹, tenha causado alterações nos tecidos, culminando na redução da área foliar das plantas de erva-mate.

Figura 3 - Área foliar Total por planta de *Ilex paraguariensis* submetidas a doses de cobre no solo em Frederico Westphalen, RS, no ano de 2018

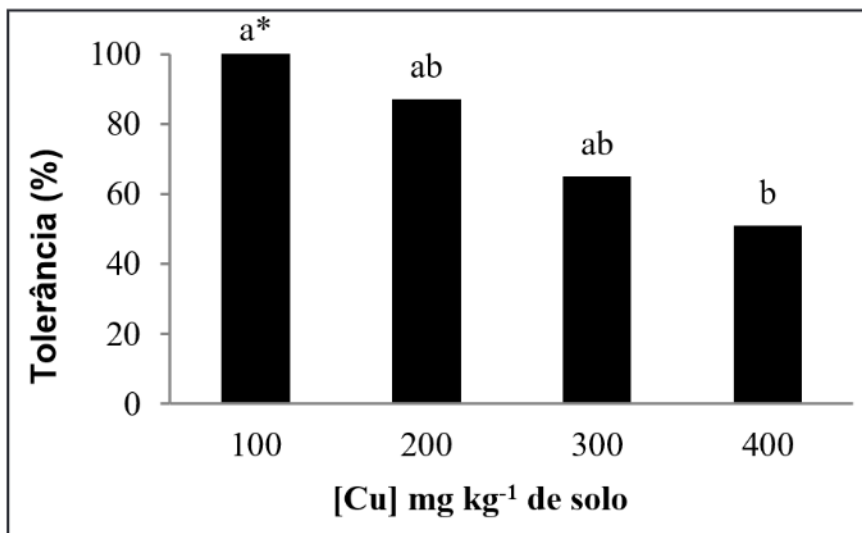


Fonte: Autores (2018)

Em que: *PR = Percentual de redução da maior dose em relação à dose zero.

A espécie de *Ilex paraguariensis* apresentou maior índice de tolerância na dose de 100 mg kg⁻¹ de Cu no solo (Figura 4). De acordo com Lux *et al.* (2004), quando esse índice for maior que 60% tem-se alta tolerância das plantas aos contaminantes. Desse modo, a erva-mate apresentou valores superiores a 60% até 300 mg kg⁻¹ de Cu adicionado ao solo, podendo ser uma planta promissora para cultivo em solos muito ácidos (pH ≤5,0), argilosos (41 - 60%) contendo médias concentrações de matéria orgânica (2,6 - 5,0%).

Figura 4 – Índice de Tolerância plantas de *Ilex paraguariensis* submetidas a doses de cobre no solo em Frederico Westphalen, RS, no ano de 2018



Fonte: Autores (2018)

Em que: *Médias não seguidas pela mesma letra diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$).

A tolerância à toxicidade ao cobre tem sido proposta na literatura e incluem mecanismos celulares como a atividade de enzimas na detoxificação de radicais livres, quelatação do Cu por compostos orgânicos e/ou compartimentalização no vacúolo das plantas (BROADLEY *et al.*, 2012). Isso faz com que as espécies tolerantes se desenvolvam em solos que os teores são tóxicos para outras plantas (TIECHER *et al.*, 2017b).

4 CONCLUSÃO

A presença de cobre no solo promove limitação no crescimento das plantas de *Ilex paraguariensis*. A massa seca de todas as partições coletadas das plantas de erva-mate apresentou redução nos seus valores a partir da utilização de 200 mg kg⁻¹ de Cu. As doses de cobre influenciaram significativamente a área foliar das plantas, promovendo um aumento na dose de 100 mg kg⁻¹ de Cu no solo, porém, a partir da utilização de 200 mg kg⁻¹ de cobre, houve redução nos valores estimados para esse parâmetro. A espécie *Ilex paraguariensis* apresentou índice de tolerância superior a 60% até a dose de 300 mg kg⁻¹ de Cu adicionado ao solo.

REFERÊNCIAS

- AMBROSINI, V. G. *et al.* Impacto do excesso de cobre e zinco no solo sobre videiras e plantas de cobertura. In: MELO, G. W. B. de; ZALAMENA, J.; BRUNETTO, G.; CERETTA, C. A. (Org.) **Calagem, adubação e contaminação em solos cultivados com videiras**. Bento Gonçalves, RS: Embrapa Uva e Vinho, p. 91-110, 2016.
- AMBROSINI, V. G. *et al.* Reduction of copper phytotoxicity by liming: A study of the root anatomy of young vines (*Vitis labrusca* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 96, p. 270-280, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.08.012>. Acesso em 11 de out., 2021.
- ALLOWAY, B. J. Sources of heavy metals and metalloids in soils. In: ALLOWAY, B. J. (ed.) **Heavy metals in soils**. Environmental Pollution, v. 22. Springer, Dordrecht, p. 11-50. 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_2. Acesso em 07 de out., 2021.
- BISSANI, C. A. *et al.* **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. 2. ed. rev. ampl., Porto Alegre, RS: Metrópole, 2008. 344p.
- BROADLEY, M. *et al.* Function of nutrients: micronutrients. In: Marschner, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3rd ed. London: Elsevier, p. 191-248. 2012.
- CAMBROLLÉ, J.; GARCÍA, J. L.; FIGUEROA, M. E.; CANTOS, M. Evaluating wild grapevine tolerance to copper toxicity. **Chemosphere**, v. 120, p. 171-178, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.044>. Acesso em 18 de out., 2021.
- CHAVES, L. H. G. *et al.* Acúmulo e distribuição de cobre e zinco em mamoneira cultivar BRS Paraguaçu e crescimento da planta. **Engenharia Ambiental**, v.7, n. 3, p.263-277, 2010.
- CHECHI, L. A.; SCHULTZ, G. A produção de erva-mate: um estudo da dinâmica produtiva nos estados do sul do Brasil. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 23. p. 16-26, 2016.
- CHIBUIKE, G. U.; OBIORA, S. C. Heavy metal polluted soils: effect on plants and bioremediation methods. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2014, p. 1-12, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/752708>. Acesso em 15 de out., 2021.
- DELLAI, A.; SILVA, R. F.; ANDREAZZA, R. Ectomicorriza no crescimento de *Eucalyptus saligna* em solo contaminado com cobre. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 624-631, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509832052>. Acesso em 04 de out., 2021.
- DE MARCO, R. *et al.* Amenizante orgânico e *Eucalyptus grandis* para fitoestabilização de solo contaminado com cobre. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, p. 1-9, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.029315>. Acesso em 04 de jun., 2021.
- DUTRA, F. L. G.; HOFFMANN-RIBANI, R. Determinação de compostos fenólicos por cromatografia líquida de alta eficiência isocrática durante estacionamento da erva-mate. **Química Nova**, v. 33, n. 1, p. 119-123, 2010.
- FAGUNDES, A. *et al.* *Ilex Paraguariensis*: compostos bioativos e propriedades nutricionais na saúde. **Brasileira de Obesidade, Nutrição e Emagrecimento**, v. 9, n. 53, p. 213-222, 2015.

FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>. Acesso em 04 de set., 2021.

FERREIRA, P. A. A. *et al.* *Rhizophagus clarus* and phosphate alter the physiological responses of *Crotalaria juncea* cultivated in soil with a high Cu level. **Applied Soil Ecology**, v. 91, p. 37-47, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.02.008>. Acesso em 04 de set., 2021.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4th ed. Boca Raton, FL, EUA: CRC Press / Taylor & Francis Group, 2011. 548p.

LEQUEUX, H.; HERMANS, C.; LUTTS, S.; VERBRUGGEN, N. Response to copper excess in *Arabidopsis thaliana*: impact on the root system architecture, hormone distribution, lignin accumulation and mineral profile. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 8, p. 673-682, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.05.005>. Acesso em 10 de set., 2021.

LUX, A. *et al.* Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity. **Physiologia Plantarum**, Medford, v. 120, n. 4, p. 537-545, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.0031-9317.2004.0275.x>. Acesso em 11 de set., 2021.

MARQUES, D. M. *et al.* Growth and physiological responses of tree species (*Hymenaea courbaril* L., *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. and *Myroxylon peruiferum* L. F.) exposed to different copper concentrations in the soil. *Revista Árvore*, Viçosa, MG, v. 42, n. 2, p. 1-11, 2018. Disponível em: <http://doi.org/10.1590/1806-90882018000200002>. Acesso em 18 de out., 2021.

MATEOS, R. *et al.* Improved LC-MS characterization of hydroxycinnamic acid derivatives and flavonols in different commercial mate (*Ilex paraguariensis*) brands. Quantification of polyphenols, methylxanthines, and antioxidant activity. **Food Chemistry**, v. 241, p. 232-241, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.085>. Acesso em 06 de out., 2021.

PIMENTEL, G. *et al.* Yerba mate extract (*Ilex paraguariensis*) attenuates both central and peripheral inflammatory effects of diet-induced obesity in rats. **The Journal of Nutrition Biochemistry**, v. 24, n. 5, p. 809-818, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2012.04.016>. Acesso em 06 de out., 2021.

SILVA, R. F. *et al.* Interferência de doses de cobre no crescimento e na qualidade de mudas de *Bauhinia forficata* Link, *Pterogyne nitens* Tul e *Enterolobium contortisiliquum* Vell. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 26, n. 2, p. 647-655, 2016. Disponível em: <http://doi.org/10.5902/1980509822764>. Acesso em 18 de out., 2021.

SILVA, R. F. *et al.* Efeito do cobre sobre o crescimento e qualidade de mudas de *Stryphnodendron polyphyllum* Mart. e *Cassia multijuga* Rich. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 24, n. 3, p. 717-725, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509815730>. Acesso em 18 de out., 2021.

SOBRAL, M.; JARENKOW, J. A. (Orgs.) **Flora arbórea e arborescente do Rio Grande do Sul**. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2013. 357p.

STORCK, L. *et al.* **Experimentação vegetal**. 3. ed. Santa Maria, RS: Editora da UFSM. 2011. 199p.

STURION, J. A; RESENDE, M. D. V. de. **Melhoramento genético da erva-mate**. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2010. 274p.

STRECK, E. V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. rev. ampl., Porto Alegre, RS: EMATER/RS, 2008. 222p.

TIECHER, T. L. *et al.* Principais doenças da videira e contaminação de solos de vinhedos com cobre e zinco. In: TIECHER, T. (Org.). **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. Frederico Westphalen, RS: URI, 2017b. p. 124-140.

TIECHER, T. L. *et al.* The potential of *Zea mays* L. in remediating copper and zinc contaminated soils for grapevine production. **Geoderma**, v. 262, p. 52-61, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.015>. Acesso em 18 de out., 2021,

TIECHER, T. L. *et al.* Tolerance and translocation of heavy metals in young grapevine (*Vitis vinifera*) grown in sandy acidic soil with interaction of high doses of copper and zinc. **Scientia Horticulturae**, v. 222, p. 203-212, 2017a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scientia.2017.05.026>. Acesso em 10 de out., 2021.

TOSELLI, M. *et al.* Response of potted grapevines to increasing soil copper concentration. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. 15, p. 85-92, 2009. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1755-0238.2008.00040.x/abstract>. Acesso em 11 de out., 2021.

VIDOR, M. A. *et al.* Variabilidade genética em um ensaio de progênies de erva- mate (*Ilex paraguariensis* St.Hil.). **Ciência Rural**, v. 32, n. 4, p. 583-587, 2002.

WEI, B. G.; YANG, L. S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. **Microchemical Journal**, v. 94, p. 99-107, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.09.014>. Acesso em 18 de out., 2021.

YRUELA, I. Copper in plants: acquisition, transport and interactions. **Functional Plant Biology**, v. 36, p. 409-430, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/FP08288>. Acesso em 18 de out., 2021.

ZACCHINI, M. *et al.* Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics. **Water Air and Soil Pollution**, v. 197, p. 23-34, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9788-7>. Acesso em 18 de set., 2021.

Contribuição de Autoria

1 Nilton César Mantovani

Engenheiro Florestal, Dr., Professor

<https://orcid.org/0000-0002-6339-7215> • mantovani.nilton@gmail.com

Contribuição: Conceituação, Investigação, Recursos, Supervisão, Redação- revisão e edição

2 Hilda Hildebrand Soriani

Bióloga, D.ra, Professora

<https://orcid.org/0000-0002-2563-7951> • hilda.soriani@ufsm.br

Contribuição: Conceituação, Metodologia, Recursos, Supervisão, Redação- revisão e edição

3 Antônio Marcos Zuliani Lunkes

Engenheiro Florestal, Especialista em Gestão Ambiental, Graduando em Zootecnia

<https://orcid.org/0000-0002-4547-3755> • antoniolunkes@gmail.com

Contribuição: Conceituação, Análise formal, Investigação, Metodologia, Administração do projeto, Supervisão, Redação- revisão e edição

4 Fabio Santos Rangel Junior

Engenheiro Florestal, Mestrando

<https://orcid.org/0000-0002-0371-0636> • fabiorangel@usp.br

Contribuição: Investigação, Metodologia

Como citar este artigo

Mantovani, N. C.; Soriani, H. H.; Lunkes, A. M. Z.; Rangel Junior, F. S. Crescimento e tolerância de mudas de *Ilex paraguariensis* A.St.-Hil. cultivadas em solo contaminado com cobre. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 32, n. 4, p. 1948-1963, 2022. DOI 10.5902/1980509864216. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509864216>.