

DESENVOLVIMENTO E POTENCIAL FITORREMEIADOR DE ESPÉCIES FLORÍCOLAS EM RESPOSTA AO EXCESSO DE COBRE NO SOLO

Janine Farias Menegaes¹

Alexandre Swarowsky²

Rogério Antônio Bellé³

Fernanda Alice Antonello Londero Backes⁴

RESUMO: A contaminação de Cu (cobre) no solo é um problema recorrente, sobretudo em áreas vitivinícolas e, na tentativa de amenizar os efeitos nocivos desse elemento no solo, a utilização da técnica de fitorremediação tem apresentado resultados positivos. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desenvolvimento vegetativo e o potencial fitorremediador utilizando diferentes espécies de flores (calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo) em resposta ao excesso de Cu no solo, buscando uma agricultura de baixo impacto ambiental. O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado, em esquema 3x4 (flores: calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo e doses de Cu no solo: zero (sem adição), 250, 500 e 750 mg kg⁻¹), com cinco repetições, em casa de vegetação. O solo utilizado foi coletado em área vitivinícola do município de Pinto Bandeira (RS), com 75 anos de cultivo, apresentando alto teor de Cu no solo. Observou-se que as três espécies florícolas apresentam tolerância ao cultivo em solo com excesso de Cu, contudo, verificou-se que o incremento de Cu no solo afetou negativamente o desenvolvimento típico das espécies de calla-lily e crisântemo, inclusive no florescimento. E, que nas mesmas condições, a cravina-de-jardim demonstrou-se com boas aptidões fitorremediativas, com exuberante florescimento e sem indícios de fitotoxidez, sendo esta promissora à fitorremediação do solo.

¹ Doutora em Agronomia pela UFSM. Docente voluntária do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria (RS), Brasil. E-mail: janine_rs@hotmail.com

² Doutor em Ciências do Solo pela Universidade da Califórnia, Davis. Docente do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria (RS), Brasil.

³ Doutor em Biologia e Fisiologia de Plantas pela Universidade Pierre et Marie Curie, Paris. Docente do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria (RS), Brasil.

⁴ Doutora em Produção Vegetal pela UFV. Docente do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria (RS), Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: Agricultura de baixo impacto ambiental; Áreas vitivinícolas; Floricultura.

PHYTOREMEDIATOR DEVELOPMENT AND CAPACITY OF FLOWER BEARING SPECIES AS A RESPONSE TO EXCESS OF COPPER IN THE SOIL

ABSTRACT: Soil contamination by Cu is a recurring issue especially in vine-growing areas. The use of phytoremediation technique to mitigate the harmful effects of the element in the soil has provided positive results. The vegetal development and phytoremediation capacity are evaluated by employing different species of flowers (calla-lily, china pink and chrysanthemum) as response to excess of Cu in the soil, for a type of agriculture with low environmental impact. Totally randomized assay had a 3 x 4 scheme (flowers: calla-lily, china pink and chrysanthemum and doses of Cu in the soil: zero (without any addition), 250, 500 and 750 mg kg⁻¹), with five replications, in a greenhouse. Soil was collected in a vine-growing area in the municipality of Pinto Bandeira (RS), a 75-year old establishment, with high Cu rates in the soil. The three flower-bearing species tolerate culture in soil with excess of copper. However, the increase in Cu in the soil negatively affected the typical development of the species calla-lily and chrysanthemum, including flowering. Within the same conditions, china pink had good phytoremediator capacity with exuberant flowering and without any trace of phytotoxicity, a highly promising event for soil phytoremediation.

KEY WORDS: Agriculture with low environmental impact; Floriculture; Vine-breeding areas.

INTRODUÇÃO

A contaminação do solo é um problema ambiental, social e econômico. Em áreas vitivinícolas, como as da Serra Gaúcha, o uso prolongado de produtos fitossanitários e adubações à base de Cu (cobre) contribuiu para o acúmulo deste elemento no solo. Em excesso, o Cu é altamente prejudicial ao desenvolvimento das plantas, impactando diretamente a produtividade, por alterar seus mecanismos bioquímicos e morfofisiológicos, além de provocar toxicidade aos microrganismos do solo e reduzir a mineralização de resíduos vegetais (MACKIE *et al.*, 2012; MIOTTO *et al.*, 2014).

O Cu no sistema solo-planta apresenta dinâmica bastante complexa, sendo afetada pelos fatores do meio, no solo a sua baixa mobilidade faz com que esse elemento permaneça em superfície, área agricultável, comprometendo a capacidade máxima de adsorção em perfil, e em pH da solução do solo acima de 6,0, há o favorecimento de sua retenção (OORTS, 2013). A essencialidade fitonutricional do Cu está na faixa de 5 a 20 mg kg⁻¹ na matéria seca para o pleno desenvolvimento da planta, participando do processo fotossintético, como constituinte da plastocianina, do transporte de elétrons, da lignificação da parede celular, entre outros. Todavia, a concentração limítrofe do dano ao benefício depende da absorção do Cu por cada espécie (PRADO, 2008; TAIZ; ZEIGER, 2009).

Na tentativa de conter os efeitos deletérios do Cu acumulado em solo, como os das áreas vitivinícolas, pesquisadores ao redor do mundo vêm utilizando plantas para auxiliar na ciclagem natural desse elemento, pela técnica de fitorremediação. Tecnologia efetiva e não destrutiva, que visa o tratamento de solos contaminados através da utilização de plantas, apresentando baixo impacto ambiental e grande aceitação pública (CAILLE *et al.*, 2005; YOON *et al.*, 2006; ZHUANG *et al.*, 2007; MARQUES *et al.*, 2011). Mackie *et al.* (2012) realizaram uma revisão bibliográfica a nível mundial sobre o tema, destacando as espécies com potencial fitorremediador do Cu em áreas de vitivinicultura, que na sua maioria são plantas destinadas à cobertura do solo e adubação verde, como *Brassica* spp., *Avena* sp., *Silene vulgaris* L., *Elsboltzia splendens* Nakai ex F. Maek, entre outras.

No Brasil, estudos têm sido realizados com maior abrangência de espécies, como *Avena sativa* L., *Arachis pintoi* Krapov. & W. C. Greg., *Bidens pilosa* L. e *Plantago lanceolata* Lann (ANDREAZZA *et al.*, 2011; 2015), *Lolium multiflorum* L. e *Vicia sativa* L. (OLIVEIRA *et al.*, 2009), *Cedrela fissilis* Vell., *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong. e *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. (CAIRES *et al.*, 2011), com resultados positivos para a fitorremediação de solos com acúmulo de Cu.

Consequentemente, a seleção de espécies vegetais com potencial de extração, remediação ou estabilização de um poluente em áreas contaminadas, depende, diretamente, de pesquisas relacionadas, visando o aprimoramento da técnica fitorremediativa, de maneira que seja socioeconômica e ambientalmente

viável. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desenvolvimento vegetativo e o potencial fitorremediador utilizando diferentes espécies de flores (*Calla-lily* (*Zantedeschia* spp.), cravina-de-jardim (*Dianthus chinensis* L.) e crisântemo (*Dendranthema grandiflora* Tzevelev) em resposta ao excesso de Cu no solo, buscando uma agricultura de baixo impacto ambiental.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado, no período de outubro de 2013 a novembro de 2014, em casa de vegetação do Setor de Floricultura do Departamento de Fitotecnia da UFSM, localizado em Santa Maria (RS) (29°43' S; 53°43' W e altitude de 95 m). O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, organizado em esquema fatorial 3x4 (flores e doses de Cu no solo), com cinco repetições. As flores foram: calla-lily (*Zantedeschia* spp.), cravina-de-jardim (*Dianthus chinensis* L.) e crisântemo cv. Dark Fiji (*Dendranthema grandiflora* Tzevelev), e as doses de Cu (cobre) adicionadas por quilo de solo foram: zero (sem adição), 250, 500 e 750 mg kg⁻¹. As quantidades de Cu adicionadas no solo foram por meio de sulfato de cobre pentahidratado [CuSO₄.5H₂O].

O solo utilizado foi coletado em área vitivinícola do município de Pinto Bandeira (RS), com 75 anos de cultivo apresentando alto teor de Cu no solo, localizado na Serra Gaúcha, a uma profundidade de 0-20 cm, classificado como Cambissolo Húmico. O laudo físico-químico do solo antes do cultivo apresentou as seguintes características: argila 12%; matéria orgânica 5%; textura 4; pH_{água(1:1)} 5,8; índice SMP 6,2; CTC_{efet.} 15 cmol_c dm⁻³; CTC_{pH 7} 18,5 cmol_c dm⁻³; saturação de bases 80,8%; saturação por Al 00 cmol_c dm⁻³; Ca 11,4 cmol_c dm⁻³; Mg 2,8 cmol_c dm⁻³; S 15,7 mg dm⁻³; P-Mehlich 66,1 mg dm⁻³; K 264 mg dm⁻³; Zn 25 mg dm⁻³; B 0,8 mg dm⁻³; Cu 188,7 mg dm⁻³.

As flores foram cultivadas em vasos plásticos, número 15 (1,3 L de volume, 14,5 cm de diâmetro e 12 cm de altura), e alocados no interior da casa de vegetação, com distribuição aleatória de 10 vasos m⁻², com regime de irrigação a cada três dias. O cultivo da calla-lily (*Zantedeschia* spp.) foi realizado no período de outubro de 2013 a março de 2014. Anteriormente ao plantio dos tubérculos foi realizado o pré-

tratamento dos mesmos com ácido giberélico em solução de 100 mg L⁻¹, por 10 minutos. Na sequência realizou-se o plantio de um tubérculo por vaso.

O cultivo da cravina-de-jardim (*Dianthus chinensis* L.), da variedade Carmine Rose, foi realizado no período de março a julho de 2014. A semeadura ocorreu em bandejas de isopor (poliestireno expandido) com duas sementes por alvéolo, em substrato comercial H-Decker® e após 15 dias foram transplantadas nos vasos.

O cultivo do crisântemo (*Dendranthema grandiflora* Tzevelev) cv. Dark Fiji foi realizado no período de julho a novembro de 2014. As mudas de crisântemo foram preparadas a partir de estacas coletadas no jardim clonal do próprio setor, com 8 cm de comprimento contendo 3 a 4 nós, em corte bisel (transversal), permanecendo as folhas inteiras nos nós superiores e retirados os demais. Após o corte, as bases das estacas foram submetidas ao tratamento com AIB (ácido indolbutílico) na forma de pó, na concentração de 1.000 mg kg⁻¹. Enraizadas em bandejas plásticas alveoladas (63 células), contendo casca de arroz carbonizada e dispostas em câmara úmida, no interior da casa de vegetação, com irrigações diárias. Após o enraizamento completo foram transplantadas nos vasos.

Avaliou-se os parâmetros fitotécnicos quanto à altura da planta (cm), comprimento de raiz (cm), número de hastes florais (unidade), fitomassa fresca e seca da parte aérea e radicular por planta (g). A secagem das plantas ocorreu em estufa de ventilação forçada a 65 °C até atingir peso constante, para determinação da fitomassa seca. Na sequência as subamostras do material vegetal seco foram trituradas em moinho tipo Willey e submetidas à digestão nítrico-perclórica e a quantificação das concentrações dos elementos Cu (cobre), P (fósforo), K (potássio), Ca (cálcio), Mg (magnésio), Fe (ferro), Mn (manganês), Zn (zinco), B (boro) e Mo (molibdênio) dos tecidos vegetais foram efetuadas por espectrofotometria de absorção atômica, no Laboratório de Absorção e Emissão Atômica da Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo (USP). Os teores de Cu no solo após o cultivo foram determinados por análise química no LAS-UFSM.

Os parâmetros fitorremediadores foram avaliados pelo fator médio de translocação na planta (FT), pelo fator médio de bioacumulação na parte aérea (FCA) e pelo fator médio de bioconcentração radicular (FCO), conforme as metodologias descritas por Caille *et al.* (2005) e Yoon *et al.* (2006).

Durante o trabalho foram monitoradas as variáveis meteorológicas temperaturas máxima e mínima e umidade relativa do ar, junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no localizado no *Campus* da UFSM. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e regressão, a 5% de probabilidade de erro, auxiliado pelo *software* estatístico SISVAR (FERREIRA, 2014).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No período da condução experimental para a calla-lily observou-se que as temperaturas médias do ar foram de 36,3 e 18,2 °C de máximas e de mínimas registradas no interior da casa de vegetação (Figura 1), respectivamente, permanecendo acima das faixas recomendadas para a cultura da calla-lily, entre 18-28 °C durante o dia e 12-18 °C à noite (CARNEIRO *et al.*, 2012). A umidade relativa do ar foi em torno de 76%; os autores supracitados recomendam que a umidade relativa média do ar esteja em torno de 60%, a fim de evitar desidratações severas nas plantas, o que não ocorreu neste experimento.

Na fase experimental da cravina-de-jardim a amplitude térmica média do ar foi de 27,3 e 13,0 °C de máxima e de mínima, respectivamente (Figura 1). Segundo Sato e Lessa (2012), a faixa térmica de crescimento ótimo para *Dianthus* sp. é de 17 a 20 °C. A média da umidade relativa do ar foi de 92,5%. Para a fase experimental do crisântemo a amplitude térmica média do ar registrada foi de 28,4 e 18,2 °C, de máxima e de mínima, respectivamente, e a média da umidade relativa do ar foi de 84,4% (Figura 1). A faixa térmica média para o cultivo de crisântemo situa-se em temperaturas diurnas de 25 °C e noturnas de 18 °C (BARBOSA *et al.*, 2012).

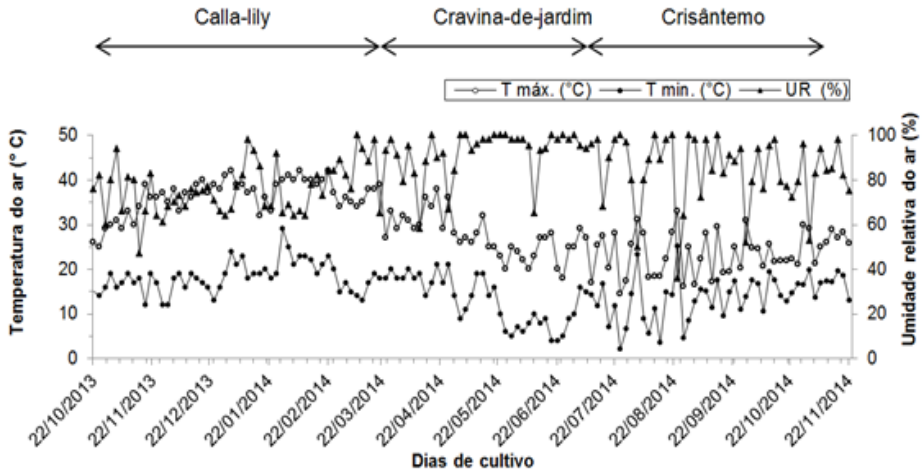


Figura 1. Temperatura do ar máxima e mínima (°C) e umidade relativa do ar (%) das espécies florícolas calla-lily (*Zantedeschia* spp.), cravina-de-jardim (*Dianthus chinensis* L.) e crisântemo (*Dendranthema grandiflora* Tzevelev) cv. Dark Fiji cultivadas em função das doses de Cu adicionadas no solo.

Observou-se que a altura de todas as plantas foi reduzida com o incremento de Cu no solo, sendo as plantas de calla-lily e crisântemo mais sensíveis às doses cúpricas testadas (Figura 2A). A mesma tendência reductiva foi verificada para o comprimento radicular para as três espécies florícolas com o aumento de Cu no solo (Figura 2B). As plantas de calla-lily apresentaram amarelecimento e necrose nas bordaduras foliares, os quais foram mais expressivos conforme o incremento de Cu no solo, contudo os tubérculos e as raízes apresentaram-se sadios. As plantas de cravina-de-jardim apesar de ter apresentado redução na sua altura e em seu comprimento radicular o seu desenvolvimento típico não foi afetado, exibindo um exuberante florescimento. Já as plantas de crisântemo exibiram raízes enegrecidas e pouco desenvolvidas de acordo com o incremento de Cu no solo, bem como na senescência precoce das folhas e na baixa taxa de florescimento.

A diferença do número de hastes florais para as espécies estudadas respeita a estrutura e biologia de cada espécie. A calla-lily manteve constante a emissão de hastes florais nas diferentes doses de Cu, já a emissão de hastes florais da cravina-de-jardim foi decrescendo com o incremento de Cu no solo e o crisântemo foi conduzido em haste única, neste caso sem diferenças entre as doses de Cu (Figura 2C).

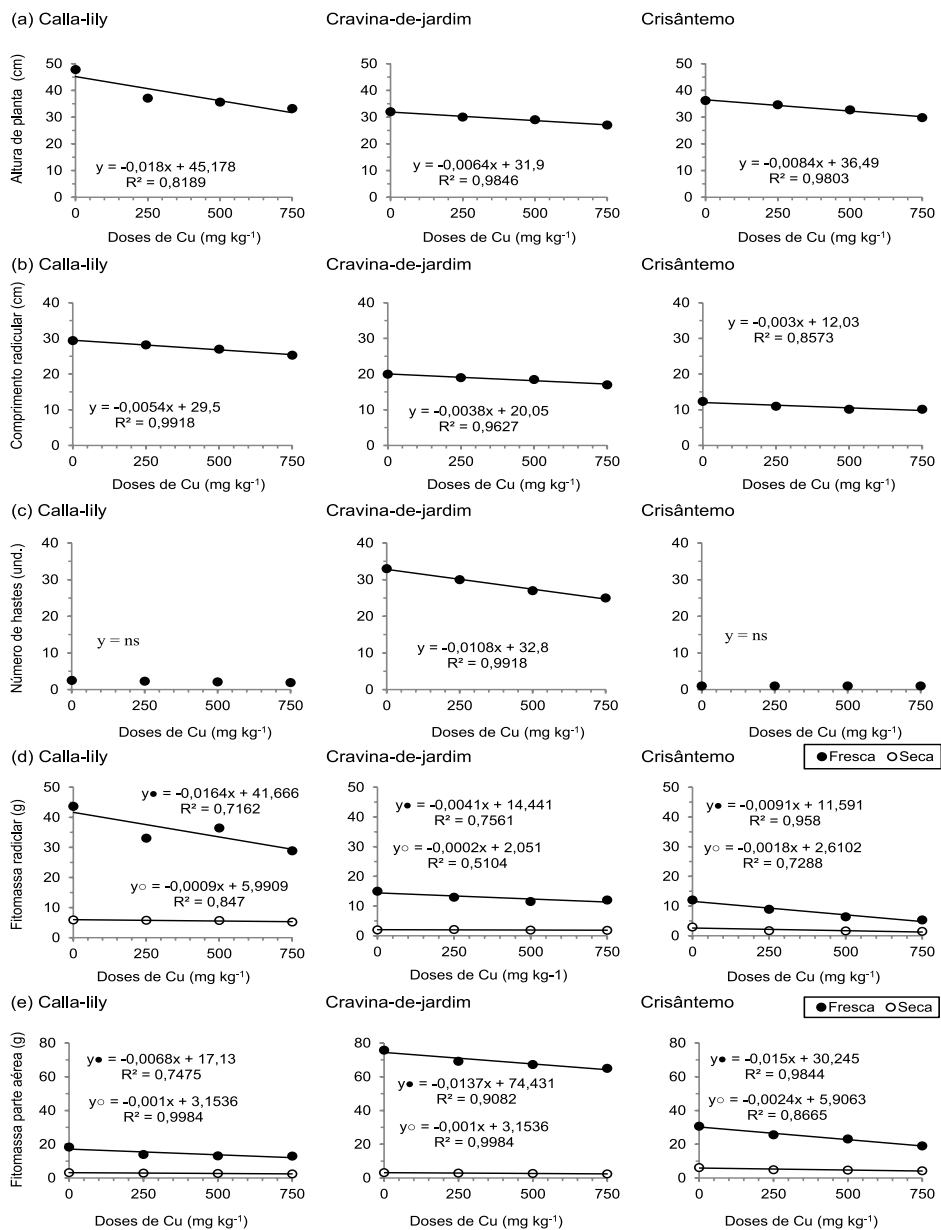


Figura 2. Altura da planta (a), comprimento radicular (b), número de hastes florais (c), fitomassa fresca e seca radicular (d), fitomassa fresca e seca da parte aérea (e) das espécies florícolas calla-lily (*Zantedeschia* spp.), cravina-de-jardim (*Dianthus chinensis* L.) e crisântemo (*Dendranthema grandiflora* Tzevelev) cv. Dark Fiji cultivadas em função das doses de Cu adicionadas no solo. ns: não significativo.

A produção de fitomassa radicular e parte aérea para as espécies calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo foram variáveis (diferentes entre os tratamentos), sendo 70,8; 17,1 e 24,4% para fitomassa média fresca radicular e 29,2; 82,9 e 75,6% para fitomassa média fresca parte aérea, respectivamente (Figuras 2D e 2E). Observou-se que a fitomassa seca radicular e da parte aérea seguiram desempenhos similares à fitomassa fresca em todas as espécies em relação aos teores de Cu no solo, com umidade média de planta de 82,9; 84,6 e 78,6% para calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo, respectivamente.

Carneiro *et al.* (2012) mencionam que o acúmulo de fitomassa nos tubérculos ocorre em função da translocação de fotoassimilados da parte aérea para os tubérculos, visando o crescimento e o desenvolvimento dos mesmos, característico de plantas com órgão de reserva, como a calla-lily, consequentemente resulta em maior concentração de massa seca.

A produção de fotoassimilados e as relações de acúmulo de fitomassa entre as partes aérea e radicular são variáveis e estão diretamente associados à tolerância da espécie ao contaminante, bem como as suas adaptações bioquímicas, permitindo assim o seu cultivo em elevadas concentrações deste elemento (TAIZ; ZEIGER, 2009). Miotto *et al.* (2014) e Zhuang *et al.* (2007) relatam que a produção de biomassa é um dos fatores preponderantes para a eficiência da fitoextração de metais pesados no solo.

Tavares *et al.* (2013), cultivando sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), milho (*Zea mays* L.), algodão (*Gossypium hirsutum* L.), girassol (*Helianthus annuus* L.) e mucuna (*Mucuna pruriens* (L.) DC) em solos contaminados por metais pesados, contendo entre eles o Cu, verificaram maior produção de fitomassa da parte aérea em comparação à fitomassa seca e os autores atribuíram este desempenho à adaptação individual de cada espécie aos contaminantes do solo, o que corrobora nossos resultados.

3.1 INTERAÇÕES DAS DOSES DE Cu ADICIONADAS NO SOLO COM O DESENVOLVIMENTO NUTRICIONAL

Observou-se que a concentração média de Cu na fitomassa seca da calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo na parte aérea foi de 17,3; 31,5 e 71,4 mg kg⁻¹,

respectivamente, e nas raízes foi de 67,5; 273,6 e 787,7 mg kg⁻¹, respectivamente (Figura 3A).

Astrês espécies florícolas seguiram uma tendência similar, proporcionalmente, de aumento na concentração de Cu na fitomassa radicular com o incremento de Cu no solo, com concentração de Cu 79,6; 96,2 e 79,3% para calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo, respectivamente. Malavolta (1997) diz que o Cu tende a acumular nas raízes devido à sua baixa mobilidade no solo.

Marsola *et al.* (2005), cultivando feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em solos contaminados por metais pesados, entre eles o Cu, atribuíram que a grande diferença entre as concentrações deste elemento na parte aérea e radicular ao mecanismo de redução da difusão de cátion no interior do tecido, protegendo-o da intoxicação. De modo que a demasiada retenção de Cu nas raízes pode ser um indicativo de tolerância da planta ao excesso deste elemento no solo, diagnosticando o seu grau de contaminação (ZANCHETA *et al.*, 2011).

Gómez *et al.* (2010), cultivando calla-lily (*Z. elliptiana* Engler) em solo de regiões cafeeiras na Colômbia com excesso de Cu, observaram na fitomassa seca dos tubérculos o acúmulo de 86,75 mg kg⁻¹ de Cu, sem danos morfológicos às plantas. Zhuang *et al.* (2007), cultivando a cravina-de-jardim em solos contendo metais pesados como zinco (Zn), chumbo (Pb) e cádmio (Cd), verificaram a tolerância da espécie a estes metais, indicando a mesma como planta fitorremediadora.

A nutrição mineral é uma interação da disponibilidade dos nutrientes no solo e a forma de absorção e aproveitamento pela planta, podendo haver efeitos sinérgicos ou antagônicos, conforme a concentração de cada nutriente no sistema solo-planta e nas condições ambientais às quais estão submetidos (PRADO, 2008; TAIZ; ZEIGER, 2009). Malavolta (1997) menciona que dependendo das concentrações de Cu no solo, os seus efeitos na planta podem ser sinérgicos ou antagônicos, sobretudo com os nutrientes de fósforo (P), cálcio (Ca) e magnésio (Mg).

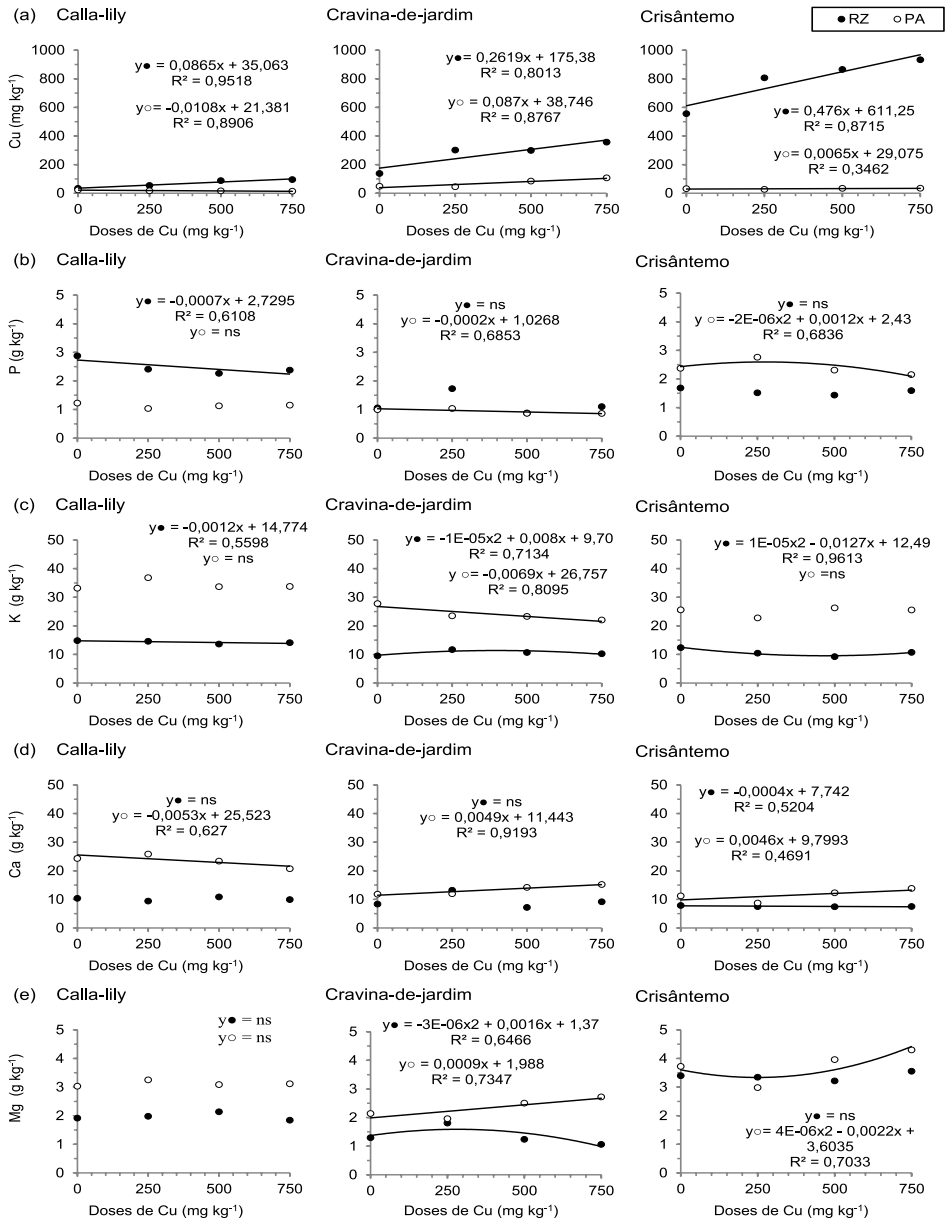


Figura 3. Conteúdo dos nutrientes Cu (A), P (B), K (C), Ca (D) e Mg (E) na fitomassa seca radicular (RZ) e da parte aérea (PA) das espécies florícolas calla-lily (*Zantedeschia* spp.), cravina-de-jardim (*Dianthus chinensis* L.) e crisântemo (*Dendranthema grandiflora* Tzevelev) cv. Dark Fiji cultivadas em função das doses de Cu adicionadas no solo. ns: não significativo.

Observou-se que o incremento de Cu no solo provocou uma tendência decrescente na concentração de P na fitomassa para as três espécies florícolas, registrando médias deste nutriente na fitomassa seca na parte aérea de 1,1; 0,9 e 2,4 g kg⁻¹ para calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo, respectivamente, e nas raízes os valores foram de 2,5; 1,6 e 1,2 g kg⁻¹, respectivamente (Figura 3B). Malavolta (1997) cita para flores e plantas ornamentais, em geral, que a exigência nutricional foliar de P é de 2,5 a 5,0 g kg⁻¹ na matéria seca para obterem-se níveis de florescimento mínimo e sem danos morfofisiológicos das plantas, sobretudo a fotossíntese.

O teor médio de K na fitomassa seca da calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo na parte aérea foi de 34,4; 25,1 e 24,2 g kg⁻¹, respectivamente, e nas raízes foi de 14,3; 10,7 e 10,5 g kg⁻¹, respectivamente (Figura 3C). As plantas exigem altos níveis de K foliar em torno de 20 a 40 g kg⁻¹ de matéria seca para a manutenção das suas atividades enzimáticas e expansão celular (MALAVOLTA, 1997; PRADO, 2008). Verificou-se que houve para todas as espécies testadas uma redução no acúmulo de K na fitomassa em função do aumento do Cu no solo.

A concentração média de Ca na fitomassa seca da calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo na parte aérea foi de 23,6; 11,5 e 13,3 g kg⁻¹, e nas raízes foi de 10,1; 7,6 e 9,5 g kg⁻¹, respectivamente (Figura 3D). O Ca é um fitonutriente essencial para a estrutura e resistência mecânica da parede celular, com faixa ideal de 10 a 15 mg kg⁻¹ na matéria seca (PRADO, 2008). Observou-se que a espécie calla-lily apresentou 33,7 mg kg⁻¹ de Ca na matéria seca total. Valores altos são de Ca característicos das espécies da família Araceae, pois os altos índices de oxalato de cálcio nos seus vacúolos estão relacionados à promoção estrutural da planta (MÁRQUEZ, 1999).

O conteúdo médio de Mg na fitomassa seca da calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo na parte aérea foi de 3,1; 3,7 e 2,3 g kg⁻¹ e nas raízes foi de 2,0; 3,4 e 1,4 g kg⁻¹, respectivamente (Figura 3E). A fitoessencialidade foliar do Mg varia na faixa de 2,0 a 5,0 g kg⁻¹ na matéria seca, com participação direta na estruturação da clorofila e sínteses enzimáticas (MALAVOLTA, 1997; PRADO, 2008).

A concentração média de Fe na fitomassa seca da calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo na parte aérea foi de 382,1; 207,2 e 824,9 mg kg⁻¹, respectivamente, e nas raízes foi de 574,5; 788,5 e 946,0 mg kg⁻¹, respectivamente (Figura 4A). O micronutriente Fe é um constituinte enzimático e transportador de elétrons na

fotossíntese, sendo essencial para o desenvolvimento vegetal (TAIZ; ZEIGER, 2009). Estes valores encontrados são superiores aos relatados por Kirkby e Römheld (2007) para Fe, cuja faixa exigida pelas plantas varia de 50 a 100 mg kg⁻¹ na matéria seca.

Os mesmos autores dizem que valores de Fe acima destes podem provocar deficiência deste nutriente em virtude da inibição do crescimento foliar em extensão, pois 80% do Fe foliar encontram-se nos cloroplastos, no sítio primário, que quando desbalanceado acarreta disfunções nas folhas, principalmente na atividade da fotossíntese. No entanto, neste experimento não foram observados sintomas de fitotoxicidade por Fe nas plantas cultivadas.

O teor médio de Mn na fitomassa seca da calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo na parte aérea foi de 0,0; 0,0 e 960,3 mg kg⁻¹, respectivamente, e nas raízes foi de 0,0; 47,8 e 890,3 mg kg⁻¹, respectivamente (Figura 4B). A exigência fitonutricional de Mn varia de 10 a 20 mg kg⁻¹ na matéria seca e quando abaixo destes valores pode ocasionar clorose internerval nas folhas (PRADO, 2008), o que não foi observado nestas condições experimentais. O Mn atua como cofator de várias reações, como a reação de quebra da molécula da água e do sistema de evolução de O₂ na fotossíntese e também na viabilidade do grão de pólen (KIRKBY; RÖMHELD, 2007), importante para a plena floração.

A concentração média de Zn na fitomassa seca da calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo na parte aérea foi de 88,4; 50,3 e 64,8 mg kg⁻¹, respectivamente, e nas raízes foi de 65,8; 73,0 e 94,1 mg kg⁻¹, respectivamente (Figura 4C). Em geral, a exigência nutricional de Zn pelas plantas varia de 10 a 30 mg kg⁻¹ na matéria seca, com grande importância na síntese e conservação das auxinas, quando em excesso apresenta correlação direta com o Fe formando manchas peciolas avermelhadas (KIRKBY; RÖMHELD, 2007), o que não foi observado neste trabalho em todas as espécies florícolas. Zhuang *et al.* (2007) verificaram em áreas contaminadas por Zn utilizando a cravina-de-jardim com finalidade fitorremediativa o acúmulo de altas concentrações deste elemento nas partes aérea e radicular sendo de 282 e 228 mg kg⁻¹, respectivamente, sem prejuízo morfofisiológico à espécie.

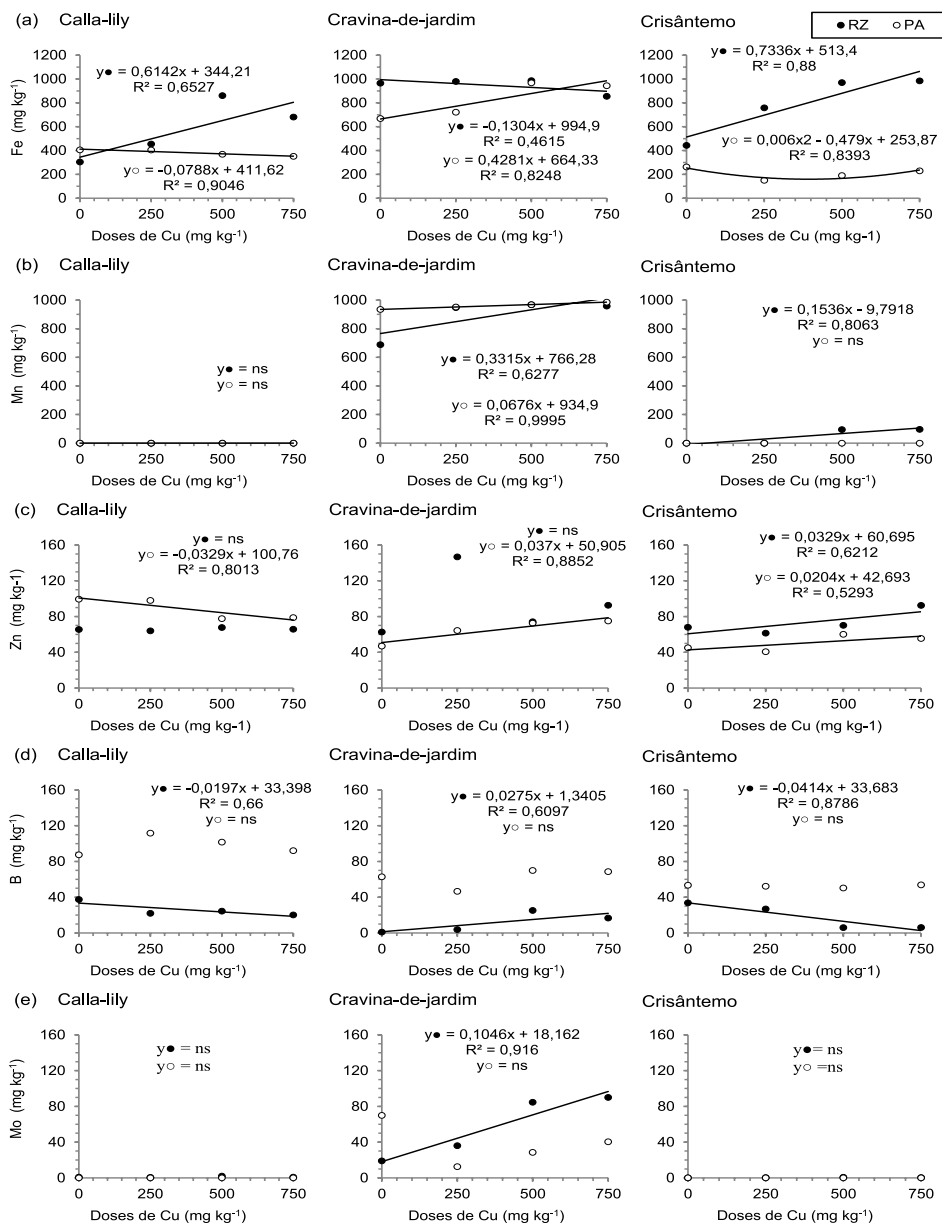


Figura 4. Conteúdo dos nutrientes Fe (A), Mn (B), Zn (C), B (D) e Mo (E) na fitomassa seca radicular (RZ) e da parte aérea (PA) das espécies florícolas calla-lily (*Zantedeschia* spp.), cravina-de-jardim (*Dianthus chinensis* L.) e crisântemo (*Dendranthema grandiflora* Tzevelev) cv. Dark Fiji cultivadas em função das doses de Cu adicionadas no solo. ns: não significativo.

O conteúdo médio de B na fitomassa seca da calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo na parte aérea foi de 98,2; 52,5 e 62,0 mg kg⁻¹ e nas raízes foi de 26,0; 18,2 e 11,6 mg kg⁻¹, respectivamente (Figura 4D). Estes valores se aproximam dos relatos quanto às exigências nutricionais das plantas, exceto aos teores registrados na fitomassa seca de calla-lily. Em geral, a faixa de B varia de 12 a 50 mg kg⁻¹ na matéria seca (PRADO, 2008). O boro tem sua fitoessencialidade na floração, na síntese da parede celular e na manutenção da integridade das membranas plasmáticas e sua deficiência influencia negativamente o crescimento de novas raízes e brotações (TAIZ; ZEIGER, 2009). O boro apesar da sua baixa mobilidade torna-se disponível e é absorvido pela planta com pH próximo de 6,0 (MALAVOLTA, 1997), o que pode explicar o acúmulo de B na fitomassa seca destas espécies, considerando que o valor de pH do solo utilizado foi de 5,8.

A concentração média de Mo na fitomassa seca da calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo na parte aérea foi de 0,0; 0,0 e 37,8 mg kg⁻¹, respectivamente, e nas raízes foi de 1,0; 0,3 e 57,4 mg kg⁻¹, respectivamente (Figura 4E). As exigências nutricionais em teor foliar de Mo são relativamente baixas quando comparadas com os demais micronutrientes que variam de 0,03 a 3,5 mg kg⁻¹ na matéria seca (MALAVOLTA, 1997). Entretanto, são igualmente essenciais para o pleno crescimento e desenvolvimento vegetal.

3.2 PARÂMETROS FITORREMEIATIVOS

A Figura 5 apresenta as relações dos fatores fitorremediativos avaliados pelo fator médio de translocação na planta (FT), fator médio de bioacumulação na parte aérea (FCA) e fator médio de bioconcentração radicular (FCO), que quanto mais próximo de um (1) mais eficiente é a translocação do elemento na planta, bem como seu acúmulo em fitomassa

Verificou-se que cada espécie obteve desempenho diferenciado. Para o FT que sugere a transferência de Cu entre a parte aérea e radicular, para todas as espécies foram inferior a um, obtendo índices médios de 0,33; 0,04 e 0,27 para calla-lily, cravina-de-jardim e crisântemo, respectivamente.

Para o FCA, indicativo entre a acumulação de Cu na parte aérea e disponibilidade deste elemento após o cultivo, as espécies calla-lily, cravina-de-jardim

e crisântemo apresentaram fatores médios de 0,05; 0,16 e 0,68 respectivamente. Já o FCO, que indica a acumulação de Cu nas raízes após o cultivo, para a calla-lily foi abaixo de um (1) com fator de 0,14, no entanto, para as espécies cravina-de-jardim e crisântemo nos fatores médios foram de 4,11 e 2,51 respectivamente, apresentando altas concentrações de Cu nas raízes.

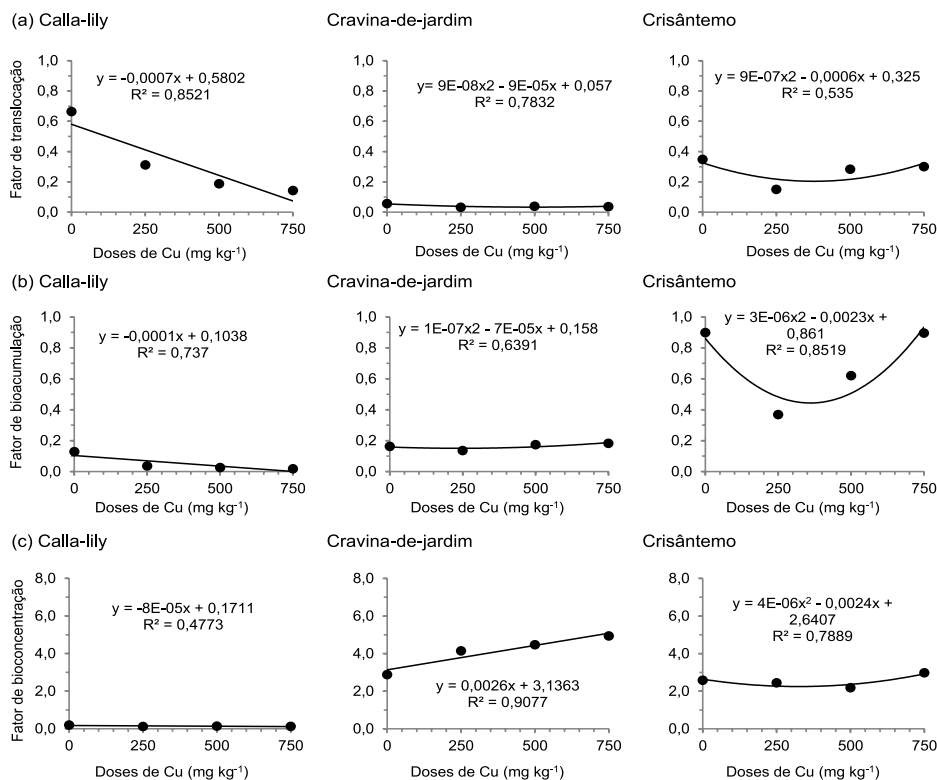


Figura 5. Fatores de translocação na planta (A), de bioacumulação da parte aérea (B) e de bioconcentração nas raízes (C) espécies florícolas calla-lily (*Zantedeschia* spp.), cravina-de-jardim (*Dianthus chinensis* L.) e crisântemo (*Dendranthema grandiflora* Tzevelev) cv. Dark Fiji cultivadas em função das doses de Cu adicionadas no solo.

Resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho foram observados por Andrezza *et al.* (2015) para as espécies de *Bidens pilosa* L. e *Plantago lanceolata* Lann. em solos com excesso de Cu, com valores de FT de 0,04 e 0,15, respectivamente; os autores concluíram que ambas as espécies apresentaram

características fitorremediativas. Araújo *et al.* (2011) relatam que as plantas com fatores menores que um apresentam tolerância aos elementos metálicos, como o Cu, caracterizando-se como planta absorvente e retentora deste elemento. Plantas com estas características podem facilitar o processo natural de transferência e de distribuição do Cu nos componentes do ecossistema, através da sua ciclagem biogeoquímica (CAIRES *et al.*, 2011; TAVARES *et al.*, 2013).

Em relação à qualidade estética das espécies, observou-se que a calla-lily e o crisântemo apresentaram danos provocados pelo excedente de Cu no solo, em que foi verificado o não florescimento da calla-lily e ocorreram indícios de fitotoxicidade nas folhas e inflorescência do crisântemo. Contudo, para a espécie de cravina-de-jardim não foram observados danos estéticos durante o período de cultivo, concluindo que esta espécie seja apta como planta fitorremediativa para ambientes com altos teores de Cu no solo. Portanto, de maneira geral, todas as espécies apresentaram tolerância no cultivo em solos com excesso de Cu, em áreas vitivinícolas como as da Serra Gaúcha.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Constatou-se que as três espécies floríferas apresentam tolerância ao cultivo em áreas com excesso de Cu no solo.

A cravina-de-jardim apresenta boas aptidões fitorremediativas, em função da elevada concentração de Cu, especialmente em suas raízes, exibindo ótimo desenvolvimento com exuberante florescimento, sem indícios de fitotoxidez, podendo ser cultivada nas áreas vitivinícolas, como as da Serra Gaúcha.

Contudo, as plantas de crisântemo, mesmo com características fitorremediativas e de calla-lily, apresentaram indícios de fitotoxidez por Cu, resultando na baixa qualidade estética destas plantas, não sendo recomendado seu cultivo nestas áreas.

5 AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao Laboratório de Absorção e Emissão Atômica da Escola de Engenharia de Lorena, da Universidade de São Paulo (USP).

REFERÊNCIAS

ANDREAZZA, R.; BORTOLON, L.; PIENIZ, S.; GIACOMETTI, M.; ROEHRS, D. D.; LAMBAIS, M. R.; CAMARGO, F. A. O. Potential phytoextraction and phytostabilization of perennial peanut on copper contaminated vineyard soils and copper mining waste. **Journals Biological Trace Element Research**, Bethesda, v. 143, n. 3, p. 1729-1739, 2011.

ANDREAZZA, R. L.; BORTOLON, L.; PIENIZ, S.; BENTO, F. M.; CAMARGO, F. A. O. Evaluation of two Brazilian indigenous plants for phytostabilization and phytoremediation of copper-contaminated soils. **Brazil Journal Biological**, v. 75, n. 4, p. 868-877, 2015. DOI: 10.1590/1519-6984.01914

ARAÚJO, A. S. A.; GUILHERME, L. R. G.; LOPES, G.; CAMPOS, M. L. Fitorremediação de solos contaminados com arsênio (AS) utilizando braquiária. **Revista Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 35, n. 1, p. 84-91, 2011. DOI: 10.1590/S1413-70542011000100010

BARBOSA, J. G.; MUNIZ, M. A.; GROSSI, J. A. S.; BARBOSA, M. S. Crisântemo. In: PAIVA, P. D. O.; ALMEIDA, E. F. A. **Produção de flores de corte**. v. 1. Lavras: UFLA. 2012. p. 244-277.

CAILLE, N.; ZHAO, F. J.; MCGRATH, S. P. Comparison of root absorption, translocation and tolerance of arsenic in the hyperaccumulator *Pteris vittata* and the non-hyperaccumulator *Pteris tremula*. **New Phytologist**, Palo Alto, v. 165, p. 755-761, 2005. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2004.01239.x

CAIRES, S. M.; FONTES, M. P. F.; FERNANDES, R. B. A.; NEVES, J. C. L.; FONTES, R. L. F. Desenvolvimento de mudas de cedro-rosa em solo contaminado com cobre: tolerância e potencial para fins de fitoestabilização do solo. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 1181-1188, 2011. DOI: 10.1590/S0100-67622011000700004

CARNEIRO, D. N. M.; SANTOS FILHO, A. B.; CARNEIRO, L. F.; PAIVA, P. D. O. Callas. In: PAIVA, P. D. O.; ALMEIDA, E. F. A. **Produção de flores de corte**. v. 1. Lavras: UFLA. 2012. p. 114-146.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014. DOI: 10.1590/S1413-70542014000200001.

GÓMEZ, S.; CORREA, C. R. B.; FLORES, J. C. M. Absorción de nutrientes en *Zantedeschia elliottiana* variedad Cristal Blush y su relación con la producción de biomasa em condiciones de la zona cafetera de Colombia. **Acta Agronómica**, Palmira, v. 59, n. 4, p. 462-472, 2010.

KIRKBY, E. A.; RÖMHELD, V. **Micronutrients in plant physiology: functions, uptake and mobility**. York: The International Fertiliser Society. 2007. 24p.

MACKIE, K. A.; MÜLLER, T.; KANDELER, E. Remediation of copper in vineyards e A mini review. **Journals Environmental Pollution**, California, n. 167, p. 16-26. 2012. DOI: 10.1016/j.envpol.2012.03.023

MALAVOLTA, E. (ed.). **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

MARQUES, M.; AGUIAR, C. R. C.; SILVA, J. J. L. S. Desafios, técnicas e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 1-11, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000100001

MÁRQUEZ, M. P. **Zantedeschia: Calla Lily**. Santa Fé de Bogotá, Colômbia: Ediciones HortiTécnica, 1999. 54p.

MARSOLA, T.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Acumulação de cobre e zinco em tecidos do feijoeiro em relação com o extraído do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 92-98, 2005. DOI: 10.1590/S1415-43662005000100014

MIOTTO, A.; CERETTA, C. A.; BRUNETTO, G.; NICOLOSO, F. T.; GIROTTO, E.; FARIAS, J. G.; TIECHER, T. L.; CONTI, L.; TRENTIN, G. Copper uptake, accumulation and physiological changes in adult grapevines in response to excess copper in soil. **Plant and Soil**. v. 374, p. 593-610. 2014. DOI: 10.1007/s11104-013-1886-7

OLIVEIRA, D. L.; ROCHA, C.; MOREIRA, P. C.; LAUDARES, S. O. Plantas nativas do cerrado: uma alternativa para fitorremediação. **Revista Estudos**, Goiânia, v. 36, n. 11-12, p. 1141-1159, 2009.

OORTS, K. Copper. In: ALLOWAY, B. J. (ed.) **Heavy Metals in Soils - trace metals and metalloids in soils and their bioavailability**. 3th Edition Springer Environmental Pollution. v. 22. 2013. p. 367-394.

PRADO, R. M. **Nutrição de Plantas**. São Paulo: UNESP, 2008, 408p.

SATO, A. Y.; LESSA, M. A. Cravo. In: PAIVA, P. D. O.; ALMEIDA, E. F. A. **Produção de flores de corte**. v. 1. Lavras: UFLA. 2012. p. 222-243.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009, 848p.

TAVARES, S. R.; OLIVEIRA, S. A.; CAMARGO, C. M. Avaliação de espécies na fitorremediação de solos contaminados por metais pesados. **Revista Holos Vegetais**, v. 5, p. 80-97, 2013. DOI: 10.15628/holos.2013.1852

YOON, J.; CAO, X.; ZHOU, Q.; MA, L. Q. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. **Science of the Total Environment**, v. 368, p. 456-464, 2006. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.01.016

ZANCHETA, A. C. F.; ABREU, C. A.; ZAMBROSI, F. C. B.; ERISMANN, N. M.; LAGÔA, A. M. A. M. Fitoextração de cobre por espécies de plantas em solução nutritiva. **Bragantia**, v. 70, p. 737-744, 2011. DOI: 10.1590/S0006-87052011000400002

ZHUANG, P.; YANG, Q. W.; WANG, H. B.; SHU, W. S. Phytoextraction of heavy metals by eight plant species in the field. **Water Air Soil Pollut**, v. 184, p. 135-242, 2007. DOI: 10.1007/s11270-007-9412-2.

Recebido em: 18/06/2018

Aceito em: 01/07/2019