

COMPORTAMENTO DE *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub., *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan e *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong CULTIVADAS EM SOLO CONTAMINADO COM COBRE

PERFORMANCE OF *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub., *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan and *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong CULTIVATED IN COPPER CONTAMINATED SOIL

Rodrigo Ferreira da Silva¹ Manoeli Lupatini² Zaida Inês Antonioli³
Lineu Trindade Leal⁴ Carlos Augusto Moro Junior⁵

RESUMO

Solos contaminados por cobre podem interferir no desenvolvimento fisiológico e no estabelecimento de plantas. Uma opção para revegetação desses solos é a utilização de espécies florestais nativas tolerantes ao cobre. Este trabalho teve como objetivo avaliar a tolerância de três espécies florestais nativas ao excesso de cobre no solo. As espécies utilizadas foram: angico – *Parapiptadenia rigida*, canafístula – *Peltophorum dubium* e timbaúva – *Enterolobium contortisiliquum*. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, num esquema 3 x 5, sendo três espécies florestais e cinco doses de cobre (0, 64, 128, 192 e 256 mg kg⁻¹ de solo), com seis repetições. Determinou-se a altura de planta, massa seca da parte aérea, comprimento e área superficial específica radicular, teor de cobre na parte aérea e na raiz. A timbaúva e a canafístula apresentam tendência de armazenamento do cobre nas raízes e baixa translocação para a parte aérea. A massa seca da parte aérea da timbaúva e canafístula é incrementada com pequenas doses de cobre, enquanto que a massa seca da parte aérea do angico não é afetada pelas doses testadas. A timbaúva e o angico demonstram maior capacidade de tolerância à contaminação de cobre no solo que a canafístula.

Palavras-chave: revegetação; plantas arbóreas nativas; tolerância.

ABSTRACT

Soils contaminated by copper may interfere with the physiological development and establishment of plants. An alternative for the revegetation of these soils is the use of native species tolerant to copper. This study aimed to evaluate the tolerance of three native forest species to excess copper in the soil. The species used were: angico - *Parapiptadenia rigida*, canafistula - *Peltophorum dubium* and timbauva - *Enterolobium contortisiliquum*. The experiment was completely randomized in a 3 x 5 schedule, with three tree species and five doses of copper (0, 64, 128, 192 and 256 mg kg⁻¹ soil) with six replicates. Plant height, shoot dry weight, length and specific root surface area and copper content in shoots and roots were determined. Canafistula and timbauva species showed storage of copper in roots and low translocation to the shoot.

1. Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor Adjunto do Departamento de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, CESNORS-FW, Linha 7 de Setembro s/n, Caixa Postal 54, CEP 98400-000, Frederico Westphalen (RS). rodrigossilva@smail.ufsm.br.
2. Engenheira Agrônoma, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS). mlupatini@gmail.com, Bolsista CAPES
3. Bióloga, Dr., Professora Associada do Departamento de Solos, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS). zantoniolli@gmail.com, Bolsista de Produtividade do CNPq.
4. Engenheiro Agrônomo, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS). lineuleal@yahoo.com.br.
5. Engenheiro Agrônomo, Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS). carlosjunior52@hotmail.com

Recebido para publicação em 5/10/2009 e aceito em 2/07/2010.

The shoot dry weight of timbauva and canafistula increased with small doses of copper while the shoot dry mass of angico was not affected by the doses tested. The timbauva and angico showed greater capacity for tolerance to copper contamination in the soil than did canafistula.

Keywords: revegetation; woody native plants; tolerance.

INTRODUÇÃO

O cobre (Cu), micronutriente essencial às plantas, é um cofator de várias enzimas, tais como superóxido dismutase (SOD), citocromo oxidase, amino oxidase, lacases, plastocianinas e polifenol oxidase, também atuando, em nível molecular, na sinalização da transcrição, na fosforilação oxidativa e na mobilização de ferro. Porém, quando em excesso no ambiente, esse elemento pode causar danos severos às plantas, adicionando grupos sulfidril a proteínas e induzindo a peroxidação de lipídios das membranas celulares (YRUELA, 2005). A toxidez de cobre também pode causar estresse oxidativo por meio da geração de moléculas reativas ao oxigênio, como por exemplo, radicais superóxido (O_2^-), hidroxila (HO^\cdot) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), com consequentes danos ao DNA e a outras biomoléculas (DE VOS et al., 1992; SALISBURY e ROSS, 1992). Em razão desses efeitos tóxicos, as plantas podem apresentar distúrbios fisiológicos e nutricionais, os quais se refletem em dificuldades no estabelecimento e no desenvolvimento quando cultivadas em solos com altas quantidades de Cu disponíveis (MARSHNER, 1995; SANTOS et al., 2004).

Porém, ao mesmo tempo em que o cobre pode atuar no ciclo biológico das plantas e exercer efeitos deletérios, a vegetação pode ser uma opção na recuperação de solos que apresentam elevadas doses desse elemento (SALT et al., 1995; KABATA-PENDIAS e MUKHERJEE, 2007). Como o processo de revegetação de áreas contaminadas por metais pesados é lento, devem ser utilizadas tecnologias apropriadas como a fitorremediação. Esta se baseia na utilização de plantas adaptadas ou tolerantes ao excesso de metais no solo (CHANDHMY et al., 1998), com o objetivo de removê-los ou torná-los menos nocivos ao meio ambiente. Essa técnica vem sendo muito empregada no processo de descontaminação do solo por causa da ação menos destrutiva sobre a fauna edáfica, porém tem como fator limitante a pequena quantidade de plantas adaptadas para crescer em ambientes contaminados, pobres em nutrientes e com características edafoclimáticas intrínsecas (KHAN et al., 2000). Por isso, uma opção para o

restabelecimento vegetal nesses locais é a seleção de espécies florestais arbóreas nativas tolerantes ao cobre, as quais podem ser capazes de imobilizar maior quantidade de metais nos tecidos em relação às herbáceas (MARQUES et al., 2000).

A sobrevivência das espécies que crescem em solos com excesso de elementos contaminantes é relacionada à capacidade de tolerar e não de anular a toxicidade dos metais presentes (BAKER, 1981). A tolerância em plantas pode ser definida como a capacidade de sobreviver em solos que são tóxicos para outras plantas e se manifesta por uma interação entre um genótipo e seu meio ambiente (MACNAIR et al., 2000). Essas espécies devem ser caracterizadas de acordo com a capacidade relativa em absorver, translocar e concentrar os metais nas suas estruturas biológicas, pois são consideradas acumuladoras, indicadoras ou exclusoras, de acordo com as concentrações relativas dos metais na raiz e na parte aérea (BAKER, 1981; O'LEARY, 1994).

Assim, a escolha de espécies adequadas para utilização em programas de fitorremediação é de extrema importância, em razão da necessidade de adaptação às características locais, aos fatores limitantes do meio (PRALON e MARTINS, 2001; COUTINHO e BARBOSA, 2007) e aos diferentes comportamentos diante da contaminação (ROMEIRO et al., 2007).

Os níveis tóxicos de cobre às plantas são ainda pouco conhecidos. A concentração desse metal considerada tóxica vem sendo sugerida, porém são valores variáveis ainda desconhecidos para plantas arbóreas tropicais nativas não cultivadas. Concentrações de cobre no solo, variando de 40 mg kg⁻¹ para solo arenoso e 100 mg kg⁻¹ para solo argiloso tem sido considerada tóxicas para as plantas (ACCIOLY & SIQUEIRA, 2000). Assim, este trabalho teve por objetivo avaliar o comportamento de três espécies arbóreas nativas quanto à tolerância ao cobre no solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO-Floresta) em Santa Maria, RS. O solo utilizado para compor as unidades

experimentais foi um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (EMBRAPA, 2006). A análise química do solo, seguindo metodologia da Embrapa (1997) apresentou $\text{pH}_{\text{água}}$: 5,0; Ca+Mg: $8,4 \text{ cmol}_c \text{ Kg}^{-1}$, H+Al: $5,5 \text{ cmol}_c \text{ Kg}^{-1}$, P: $20,8 \text{ mg kg}^{-1}$, K: 212 mg kg^{-1} , matéria orgânica: $2,5 \text{ g kg}^{-1}$, argila: 21 g kg^{-1} e cobre extraído por HCl: $0,8 \text{ mg kg}^{-1}$. Para elevar o pH para 5,5, adicionou-se à mistura carbonato de cálcio (CaCO_3) e carbonato de magnésio (MgCO_3) na relação molar 3:1. Aplicaram-se o equivalente a 30 kg ha^{-1} de N na forma de uréia no plantio.

As espécies arbóreas nativas utilizadas no trabalho foram angico (*Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan), canafístula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.) e timbaúva (*Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong). As mudas foram formadas em viveiro, em bandeja de isopor, tendo como substrato areia lavada e quando apresentaram um par de folhas definitivas, aproximadamente 30 dias, foram transplantadas para os vasos de cultivo com 500 g de solo. Cada vaso de cultivo recebeu uma muda e foi considerada uma repetição.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com seis repetições, em esquema fatorial 3×5 , sendo três espécies florestais e cinco doses de cobre (x (nível natural do solo), x + 64, x + 128, x + 192 e x + 256 mg kg^{-1} de solo). O cobre foi aplicado como solução de sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) de forma suplementar. O experimento foi conduzido por 6 meses, mantendo o solo com aproximadamente 80% da capacidade de campo.

Os parâmetros analisados foram: altura de planta, massa seca da parte aérea (MSPA), comprimento radicular (CR), área superficial específica radicular (ASE), conforme Tennant (1975) e teor de cobre na raiz e na parte aérea da planta de acordo com Silva (1999). A área superficial específica do sistema radicular foi estimada conforme a fórmula: $S = 2 \pi \times R \times L$ (sendo, S: área superficial específica, L: comprimento radicular e R: raio). Para o cálculo do raio, utilizou-se a fórmula: $R = \sqrt{V} / L \times \pi$, sendo, V: volume (Massa verde do sistema radicular).

Com base nos teores de cobre na matéria seca da parte aérea e nas raízes das plantas, calculou-se a razão desses parâmetros (R/PA) e o coeficiente de impacto da contaminação do teor relativo (CITR). Este expressa a razão entre R/PA no solo com maior teor de cobre e a R/PA no solo sem contaminação. Valores de CITR acima de uma unidade indicam maior teor, proporcional

nas raízes das plantas do que na parte aérea em solo contaminado, variando de modo direto com a capacidade da espécie em limitar a translocação dos elementos da raiz para a parte aérea (MARQUES et al., 2000).

A análise estatística foi efetuada por meio da análise de variância e quando da significância dos efeitos apontados pela análise, os parâmetros avaliados foram submetidos à análise de regressão pelo programa SISVAR (FERREIRA, 2006), tomando como base os níveis de significância maiores que 95% ($P \leq 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As espécies analisadas apresentaram comportamento diferenciado com relação às doses de cobre aplicadas no solo, sendo que todos os parâmetros avaliados foram influenciados pela contaminação desse elemento ($P \leq 0,05$). A altura e a produção de matéria seca da parte aérea foram alteradas de maneira distinta pelas doses de cobre entre as espécies. Na timbaúva houve um estímulo nos parâmetros altura e MSPA nas menores doses de cobre, com posterior redução nas maiores concentrações desse elemento no solo (Figura 1a, b) (Tabela 1). Na canafístula houve um aumento da altura e da MSPA diante das crescentes doses de cobre no solo (Figura 1a, b) (Tabela 1). O angico apresentou interação diferenciada com as doses de cobre em relação às outras espécies estudadas, pois inicialmente há uma tendência ao declínio e posteriormente aumento na altura e na MSPA nas maiores doses, demonstrando não ter sido afetado pelas doses de cobre testadas (Figura 1a, b) (Tabela 1).

Resultados semelhantes aos encontrados nas plantas de canafístula e angico foram relatados por Marques et al. (2000), nos quais a espécie *Cedrela fissilis* Vell. foi pouco influenciada pelos metais do solo, chegando, o seu crescimento, a ser estimulado pelos níveis de contaminação. Para Taiz e Zeiger (2009), essa produção está associada à tolerância da espécie ao contaminante, conseguida por meio de diferentes adaptações bioquímicas que permitem à planta tolerar concentrações elevadas desses elementos.

As doses de cobre promoveram efeitos diferentes no comprimento radicular e na área superficial específica das espécies estudadas. Na canafístula, apesar de haver significância quanto à interação ($P \leq 0,05$), os parâmetros CR e ASE foram

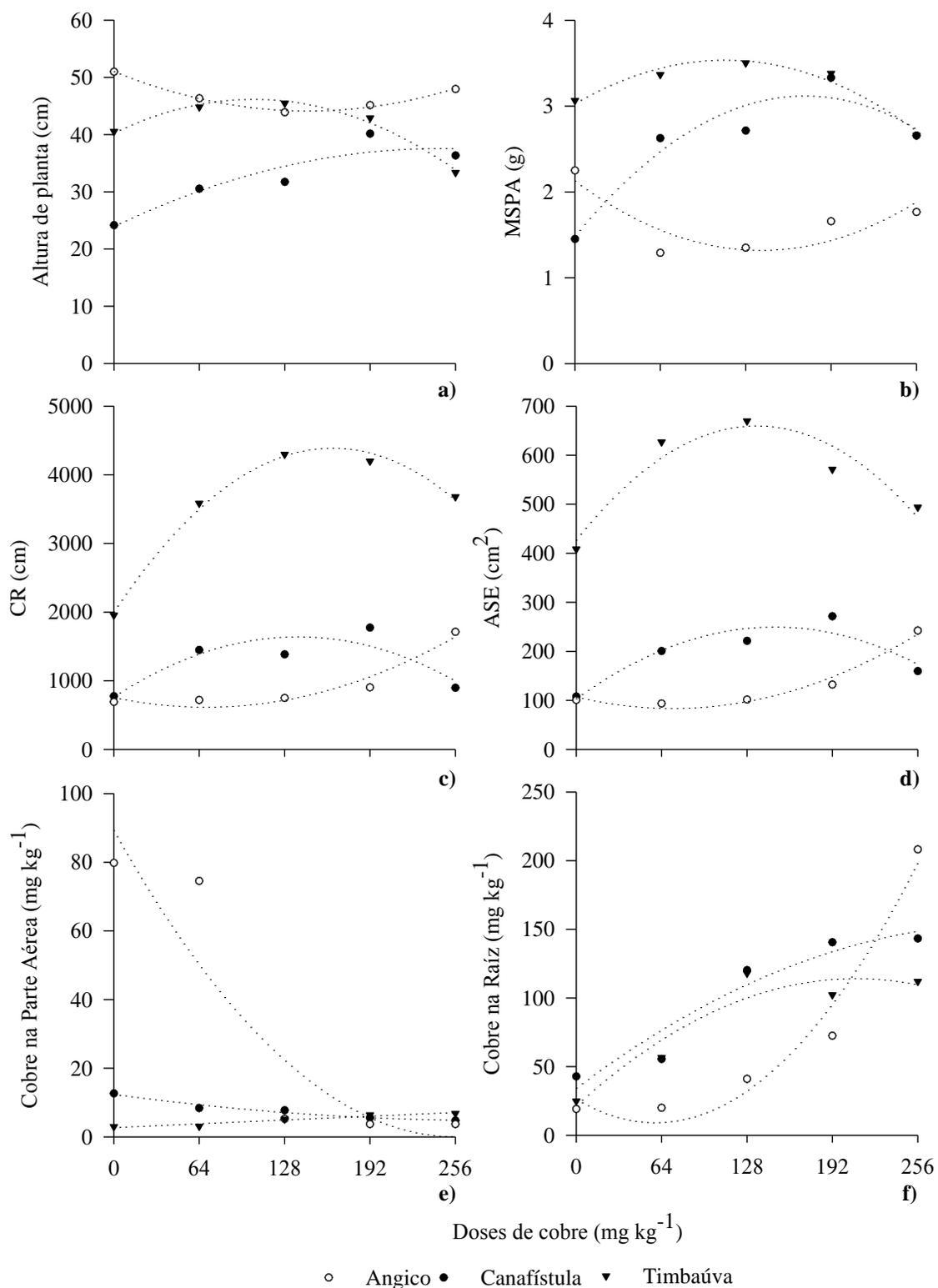


FIGURA 1: Altura de planta (a), massa seca da parte aérea (MSPA) (b), comprimento radicular (CR) (c), área superficial específica (ASE cm²) (d), teor de cobre na parte aérea (Cu parte aérea) (e) e teor de cobre na raiz (Cu raiz) (f) de angico-vermelho, canafístula e timbaúva submetidas a diferentes doses de cobre no solo.

FIGURE 1: Plant height (a), shoot dry matter (b), root length (c), specific surface area, copper level in the shoot, copper level in the root of angico, canafistula and timbauva submitted to different soil copper levels.

pouco influenciados pelas doses de cobre no solo (Figura 1c, d) (Tabela 1), apresentando tendência a serem estimulados pelas baixas doses de cobre e inibidos pela maior dose. Na timbaúva, as menores doses de cobre estimularam os parâmetros CR e ASE, porém, esses foram retardados nas doses mais elevadas (Figura 1c, d).

A toxidez de cobre nas raízes das plantas arbóreas se expressa, sobretudo, na ausência de formação de raízes e escurecimento destas, tornando-as finas e quebradiças, diminuindo a capacidade da planta de absorver nutrientes (KAHLE, 1993). Sintomas de toxidez por Cu nas raízes foram relatadas em diversas espécies de plantas (MARQUES et al., 2000; KAHLE, 1993; ALVES et al, 2003; SOARES, 1999).

Soares et al. (2000), estudando duas espécies de *Eucalyptus*, verificaram que diferentes doses de cobre exerceram efeitos negativos no comprimento total e na massa seca das raízes para as duas espécies, sintomas esses também observados por Heale e Ormrod (1982), em plantas dos gêneros

Acer rubrum e *Pinus resinosa*. Contudo, em todos os níveis de cobre no solo, as mudas de timbaúva apresentaram maior valor desses parâmetros do que em solo não contaminado (Figura 1c, d), demonstrando com isso, tendência a tolerar certos níveis de contaminação no solo.

O comportamento do angico diante da contaminação com cobre foi diferente das outras espécies estudadas, pois demonstrou um aumento do CR e da ASE em função do aumento das concentrações de cobre no solo (Figura 1c, d) (Tabela 1). O fato do CR e da ASE nas plantas de timbaúva e de angico, aparentemente, terem sido estimulados em algumas doses de cobre pode ser em consequência da maior produção de raízes secundárias, pois quando em contato com barreiras químicas, como excesso de cobre na rizosfera, as raízes cessam seu crescimento longitudinal e suberizam-se, formando novas raízes secundárias (LANDIS, 1990; TAIZ e ZEIGER, 2006), o que pode ter influenciado para o aumento desses parâmetros nessa espécie.

TABELA 1: Equações de regressão dos parâmetros altura de planta, matéria seca da parte aérea (MSPA), comprimento radicular (CR), área superficial específica (ASE), teor de cobre na parte aérea (Cu Parte Aérea) e teor de cobre na raiz (Cu Raiz) de angico, canafístula e timbaúva submetidas a diferentes doses de cobre no solo.

TABLE 1: Regression equations of the parameters plant height, shoot dry matter, root length (CR), specific surface area, shoot copper level, root copper level of angico, canafistula and timbauva submitted to different soil copper levels.

Espécie	Parâmetros analisados	Equação de regressão	r ²	r ² aj	Erro
Angico	Altura de planta	$y = 0,0003x^2 - 0,0943x + 50,974$	0,9924	0,9849	0,3379
	MSPA	$y = 4E-05x^2 - 0,0116x + 2,1245$	0,7475	0,4951	0,2733
	CR	$y = 0,0294x^2 - 4,0481x + 753,29$	0,9398	0,8796	149,349
	ASE	$y = 0,0045x^2 - 0,6451x + 106,54$	0,9708	0,9415	15,0651
	Cobre parte aérea	$y = -0,0128x^2 + 3,4527x + 426,37$	0,9061	0,6903	22,266
	Cobre na raiz	$y = 0,0049x^2 - 0,5771x + 26,1$	0,9656	0,9313	20,7279
Canafístula	Altura de planta	$Y = -0,0002x^2 + 0,1119x + 23,92$	0,8683	0,7365	0,8283
	MSPA	$Y = -6E-05x^2 + 0,019x + 1,4809$	0,9072	0,8145	0,2938
	CR	$Y = -0,0462x^2 + 12,709x + 764,1$	0,7813	0,5627	273,120
	ASE	$y = -0,0066x^2 + 1,9678x + 103,2$	0,8671	0,7343	31,9743
	Cobre na parte aérea	$y = -0,0292x + 11,567$	0,9103	0,9268	0,8371
	Cobre na raiz	$y = 0,4466x + 43,367$	0,8915	0,8471	18,7164
Timbaúva	Altura de planta	$y = -0,0005x^2 + 0,1124x + 40,275$	0,9857	0,9714	0,8283
	MSPA	$y = -4E-05x^2 + 0,009x + 3,0267$	0,9574	0,9148	0,0993
	CR	$y = -0,0891x^2 + 29,164x + 2000,1$	0,9926	0,9852	114,352
	ASE	$y = -0,0128x^2 + 3,4527x + 426,37$	0,9061	0,8122	45,360
	Cobre na parte aérea	$y = 0,0173x + 2,6952$	0,9308	0,8618	0,6730
	Cobre na raiz	$y = -0,0021x^2 + 0,8837x + 21,498$	0,9033	0,8066	17,7385

As crescentes doses de cobre aplicadas no solo influenciaram os teores desse metal na raiz e na parte aérea das espécies estudadas (Figura 1e, f) (Tabela 1). Não houve variação do teor de cobre na parte aérea das plantas de timbaúva e canafístula. Entretanto, o teor do elemento nas raízes dessas espécies foi proporcional ao aumento das doses no solo, sendo que a canafístula mostrou um comportamento linear em relação ao acúmulo de cobre na raiz e a concentração deste no solo (Figura 1e, f) o que, segundo O'Leary (1994) e Silva (2007), pode classificar essa espécie como indicadora de contaminação do metal no solo. O aumento dos teores de cobre na raiz em função da disponibilidade desse elemento no solo também foi observado na planta de angico, porém, os teores de cobre na parte aérea foram indiretamente proporcionais aos do solo (Figura 1e, f).

Plantas que acumulam metais nas raízes e não translocam para a parte aérea indicam ativar algum mecanismo regulador da traslocação do metal, podendo representar uma estratégia de tolerância ao excesso de contaminantes no solo (ANTOSIEWICZ, 1992). Plantas com essa característica, de acordo com Chen et al. (2005), possuem alta capacidade de extração de elementos contaminantes do ambiente. O elevado nível de translocação do cobre para a parte aérea pode indicar baixa tolerância a esse elemento, pois uma vez dentro das células vegetais, sistemas importantes para a sobrevivência e desenvolvimento da espécie, como funções do fotossistema I e II, podem ser afetados (OUZOUNIDOU et al., 1997; PATSIKKA et al., 2002).

Houve grande variação no CITR para as espécies, variando de 1,97 a 231,26 (Tabela 2). Verificou-se maior retenção proporcional nas raízes de todas as espécies em solo contaminado do que no controle (CITR>1). O angico reteve grande quantidade de cobre na raiz em solo com maior concentração desse elemento, evitando a translocação para a parte aérea, devendo este ser um mecanismo da espécie para tolerância ao excesso do metal no ambiente (KAHLE, 1993). O fato de restringir a translocação para a parte aérea, impedindo a ação do cobre em processos fisiológicos importantes, pode ter contribuído para a planta apresentar indícios de tolerância ao excesso do metal, como evidenciado pelo aumento da altura, MSPA, CR e ASE em altos níveis de disponibilidade do cobre no solo. A canafístula, apesar de reduzida capacidade de retenção do cobre nas raízes em relação ao angico na maior dose, também apresentou bom

TABELA 2: Coeficiente de impacto no teor relativo (CITR) do cobre entre a raiz e a parte aérea (R/PA) das espécies.

TABLE 2: Relative copper level quotient impact (CITR) between root and shoot of the species.

Espécies	R/PA	R/PA	CITR ¹
	0 mg kg ⁻¹	256 mg Kg ⁻¹	
Angico	0,24	55,53	231,26
Canafístula	3,39	30,17	8,91
Timbaúva	8,31	16,33	1,97

¹CITR = Razão do teor R/PA de cobre no tratamento 256 mg kg⁻¹ de solo dividido pela razão do teor R/PA na testemunha.

valor de CITR. Porém, mesmo com o aumento da retenção de cobre nas raízes, a MSPA, o CR e a ASE foram negativamente influenciados com o aumento das concentrações de cobre no solo. Na timbaúva, apesar desta apresentar um baixo CITR (Tabela 2), o que representaria uma baixa retenção na raiz, foi verificado elevado acúmulo de cobre nesta e baixa translocação para a parte aérea (Figura 1f), podendo esse padrão representar um indício de tolerância a esse elemento em ambientes contaminados, como evidenciado pelos parâmetros analisados, nos quais estes foram pouco influenciados pelas doses de cobre, chegando, até serem estimulados pela presença do metal em algumas doses.

De modo geral, as plantas menos influenciadas pela contaminação limitaram a traslocação do cobre para a parte aérea, fato que pode ser resultante de mecanismo que reduzem a disponibilidade na rizosfera, estimulam o bombeamento do metal na membrana plasmática, acumulando em estruturas celulares como o citoplasma e retêm o metal na parede celular da raiz (HALL, 2002). Esses são fatores relevantes a serem observados em estudos de plantas que visam à revegetação de áreas contaminadas com elementos tóxicos, pois a capacidade das espécies vegetais em tolerar ou acumular metais pesados é um fator importante para o sucesso da fitorremediação (ACCIOLY e SIQUEIRA, 2000).

CONCLUSÕES

A timbaúva e a canafístula apresentam tendência de armazenamento do cobre nas raízes e baixa translocação para a parte aérea.

A massa seca da parte aérea da timbaúva e

canafístula é incrementada com pequenas doses de cobre, enquanto que a massa seca da parte aérea do angico não é afetada pelas doses testadas.

A timbaúva e o angico demonstram maior capacidade de tolerância à contaminação de cobre no solo que a canafístula.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAES, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, 2000. p. 299-352.
- ALVES, E. et al. Avaliações fisiológicas e bioquímicas de plantas de aguapé (*Eichhornia crassipes*) cultivadas com níveis excessivos de nutrientes. **Planta daninha**, Viçosa, v. 21, p. 27-35. 2003, nesp.
- ANTOSIEWICZ, D. M. Adaptation of plants to an environment polluted with heavy metals. **Acta Societatis Botanicorum Poloniae**, Warszawa, v. 61, n. 2, p. 281-299. 1992.
- BAKER, A. J. M. Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals. **Journal Plant Nutrition**, New York, v. 3, n. 1/4, p. 643-654, 1981.
- CHANDHMY, T. M. et al. Phytoremediation – focusing on accumulator plants that remediate metal contaminated soils. **Australian Journal of Toxicology**, Adelaide, v. 4, n. 1, p. 37-51, Jan. 1998.
- CHEN, Y. X. et al. Effect of copper-tolerant rhizosphere bacteria on mobility of copper in soil and copper accumulation by *Elsholtzia splendens*. **Environment International**, Ottawa, v. 3, n. 6, p. 861-866. 2005.
- COUTINHO, H. D.; BARBOSA, AL. R. Fitorremediação: Considerações Gerais e Características de Utilização. **Silva Lusitana**, Lisboa, v. 15, n. 1, p. 103 – 117. 2007.
- DE VOS, C. H. R.; VONK, M. J.; SCHAT, H. Glutathione depletion due to copper induced phytochelatin synthesis causes oxidative stress in *Silene cucubalus*. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 98, n. 3, p. 853-858, Mar. 1992.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006. 412 p.
- EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2. ed., 1997. 212p.
- FERREIRA, D. F. **Sistemas de análise estatística para dados balanceados**. Lavras: UFLA/DEX/SISVAR, 2006. 145 p.
- HALL, J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 366, p. 1-11, Jan. 2002.
- HEALE, E. L.; ORMROD, D. P. Effects of nickel and copper on *Acer rubrum*, *Cornus stolonifera*, *Lonicera tatarica* and *Pinus resinosa*. **Canadian Journal of Botany**, v. 60, p. 2674-2681. 1982.
- KABATA-PENDIAS, A.; MUKHERJEE, A. B. **Trace elements from soil to human**. New York: Springer, 2007. 450 p.
- KAHLE, H. Response of roots of trees to heavy metals. **Environmental and Experimental Botany**, Great Britain, v. 33, n. 1, p. 99-119. 1993.
- KHAN, A. G. et al. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. **Chemosphere**, Ottawa, v. 41, n. 1-2, p.197-207, 2000.
- LANDIS, T. D. Containers and Growing Media. In: LANDIS, T. D. et al. **The container tree nursery manual**. 1990. Disponível em: (<http://www.rngr.net/Publications/ctnm>)> Acesso em: 10/04/2009.
- MARQUES, T. C. L. L. S. M.; MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Crescimento e teores de metais em mudas de espécies arbóreas tropicais em solo contaminado com metais pesados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 1, p. 121-132, jan. 2000.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1995. 889 p.
- MACNAIR, M. R.; TILSTONE, G. H.; SMITH, S. E. The genetics of metal tolerance and accumulation in higher plants. In: TERRY, N.; BANUELOS, G. **Phytoremediation of contaminated soil and water**. Flórida: CRC Press, 2000. p. 235-250.
- O'LEARY, J. W. The agricultural use of native plants on problem soil. In: YEO, A. R.; FOWERS, T. J. **Monographs on Theoretical and applied genetics**. Berlin: Springer-Verlag, 1994. p. 127-143.
- OUZOUNIDOU, G.; MOUSTAKAS, M.; STRASSER, R. J. Sites of action of copper in the photosynthetic apparatus of maize leaves: kinetic analysis of chlorophyll fluorescence, oxygen evolution, absorption changes and thermal dissipation as monitored by photo acoustic signals. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 24, n. 1, p. 81-90. 1997.
- PRALON, A. Z.; MARTINS, M. A. Utilização do resíduo industrial Ferkal na produção de mudas de *Mimosa caesalpinifolia*, em estéril de extração de argila, inoculadas com fungos micorrízicos

- arbusculares e rizóbio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 55-63. 2001.
- PATSIKKA, E. et al. Excess cooper predisposes photosystem II to photoinhibition in vivo by outcompeting iron and causing decrease in leaf chlorophyll. **Plant Physiology**, v. 129, p. 1359-1367, 2002.
- ROMEIRO, S. et al. Absorção de Chumbo e Potencial de Fitorremediação de *Canavalia ensiformes* L. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 2, p. 327-334, 2007.
- SALT, D. E. et al. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. **Plant Physiology**, Rockville, v. 109, p. 1427-1433. 1995.
- SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. **Plant physiology**. Califórnia: Wadsworth Publishing Company, 1992. 682 p.
- SANTOS, H. P. et al. **Comportamento fisiológico de plantas de aveia (*Avena strigosa*) em solos com excesso de cobre**. Bento Gonçalves: EMBRAPA Uva e vinho, 2004. 10 p. (Comunicado Técnico n. 49).
- SILVA, R. F. **Tolerância de espécies florestais arbóreas e fungos ectomicorrízicos ao cobre**. 2007. 134 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)– Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: EMBRAPA, 1999. 370 p.
- SOARES, C. R. F. S. **Toxidez de zinco, cobre, cádmio e chumbo para o eucalipto em solução nutritiva**. 1999. 132 p. Dissertação (Mestrado em agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.
- SOARES, C. R. F. S. et al. Crescimento e nutrição mineral de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva com concentração crescente de cobre. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 12, n. 3, p. 213-225. 2000.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**. São Paulo: Makron Books. 2006. 705 p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.
- TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal Ecology**, Wisconsin, v. 63, p. 995-1001. 1975.
- YRUELA, I. Copper in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 17, n. 1, p. 145-156, jan/mar. 2005.