

EFEITO DA APLICAÇÃO DE CÁDMIO SOBRE O TEOR DE NUTRIENTES EM MUDAS DE CEDRO (*Cedrela fissilis* VELL.)¹

EFFECT OF THE CADMIUM APPLICATION ON NUTRIENTS CONTENT IN CEDRO (*Cedrela fissilis* VELL.) SEEDLINGS.

Haroldo Nogueira de Paiva² Janice Guedes de Carvalho³ José Oswaldo Siqueira⁴

RESUMO

Com o objetivo de verificar o efeito da aplicação de cádmio sobre o teor de nutrientes em mudas de cedro, foi instalado um experimento em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras. O experimento seguiu um delineamento estatístico de blocos ao acaso, sendo que as mudas foram cultivadas em solução nutritiva de Clark e submetidas a doses crescentes de Cd: 0, 22, 44, 88 e 132 μM , usando como fonte o cloreto de cádmio. Após 60 dias de exposição ao metal pesado, as plantas foram colhidas e separadas em raiz, caule e folha as quais foram analisadas quanto ao teor de Cd, de macro e de micronutrientes. Os resultados mostraram que para os macronutrientes houve um aumento no teor de P, S e Ca, praticamente não houve efeito sobre o teor de K e o teor de Mg apresentaram resposta diferenciada com a parte da planta. Para os micronutrientes, observou-se que, na raiz, houve aumento no teor de Cu e Fe e redução no teor de Mn e Zn; no caule, houve aumento no teor de Cu e Zn e redução no teor de Fe e Mn, enquanto na folha, houve aumento no teor de Fe e redução no teor de Cu, Mn e Zn. O teor de Cd nas diferentes partes das mudas foi crescente com a dose do metal pesado aplicada.

Palavras-chave: *Cedrela fissilis*, cedro, cd, metal pesado, nutrição.

ABSTRACT

With the objective of verifying the effect of the cadmium application on the nutrients content in cedro seedlings an experiment was installed in the greenhouse of the Department of the Soil Science of the Federal University of Lavras. The experiment followed a statistical delineation of randomized blocks, where the seedlings were cultivated in Clark's nutrient solution and submitted to the increasing levels of Cd: 0, 22, 44, 88 and 132 μM , using as source the cadmium chloride. After 60 days of display to the heavy metal, the plants were picked up and separated in root, stem and leaf. These parts of the plants were analyzed with relationship to the Cd, macro, and micronutrients content. The results showed that for the macronutrients it had an increase in the contents of P, S and Ca; practically no effect on the content of K was observed and the Mg content presented answer

1. Parte da tese apresentada à Universidade Federal de Lavras pelo primeiro autor.
2. Engenheiro Florestal, Dr. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, CEP 36571-000, Viçosa (MG). hnpaiva@mail.ufv.br
3. Engenheira Agrônoma, Dr^a, Professora Titular do Departamento de Ciências do Solo, Universidade Federal de Lavras, CEP 37200-000, Lavras (MG). janicegc@ufla.br
4. Engenheiro Agrônomo, PhD., Professor Titular do Departamento de Ciências do Solo, Universidade Federal de Lavras, CEP 37200-000, Lavras (MG). siqueira@ufla.br

differentiated with the plant part. For the micronutrients, there was observed that it had an increase in the content of Cu and Fe and reduction in the content of Mn and Zn in the root; in the stem it had an increase in the content of Cu and Zn and reduction in the content of Fe and Mn, while in the leaf it had increase in the content of Fe and reduction in the content of Cu, Mn and Zn. The Cd content in the parts of the seedlings has increased with the dose of the applied heavy metal.

Key words: *Cedrela fissilis*, cedro, cd, heavy metal, nutrition.

INTRODUÇÃO

O cádmio é o elemento, entre os metais pesados, que tem apresentado as mais expressivas taxas de aumento no ambiente nas duas últimas décadas (ALLOWAY, 1990), e muitas propriedades do sistema solo tem sido relatadas como de grande importância na solubilidade e movimentação do Cd no perfil do solo e também na sua absorção pela planta (CHRISTENSEN, 1989). Entre essas propriedades, destacam-se, em ordem de importância, o pH da solução do solo, a capacidade de troca de cátions, o teor de matéria orgânica, o teor de argila, o potencial redox, o teor de cálcio e a presença de outros metais no sistema solo (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1984; ALLOWAY, 1990).

O cádmio é encontrado na exploração e beneficiamento de outros metais como zinco e chumbo (BOON e SOLTANPOUR, 1992); na produção de tintas, pilhas e baterias (POTSCH, 1967); nos combustíveis e lubrificantes (OLSEN, 1972); nos fertilizantes, principalmente os fosfatados (LANGENBACH e SERPA, 1985); nos corretivos (AMARAL SOBRINHO *et al.*, 1992); nos fungicidas (LAGERWERFF, 1972) e nos resíduos industriais e urbanos (ALLOWAY, 1990), tornando-se prejudicial às plantas quando esses materiais são incorporados ao meio de crescimento..

A principal causa da toxidez pelo Cd parece ser por causa da sua combinação com grupos tiólicos (-SH) de enzimas e proteínas o que provoca desarranjos no metabolismo vegetal (LAGRIFFLOUL *et al.*, 1998). Nas plantas, o Cd substitui o Zn em diversas metaloenzimas, alterando sua atividade, promove a expansão de camadas de fosfolipídeos e desacopla a fosforilação oxidativa (OBATA e UMEBAYASHI, 1997); inibe a fotossíntese, provoca distúrbios respiratórios e na fixação de CO₂, altera a permeabilidade das membranas celulares, inibe as transformações mediadas por DNA em microorganismos, interfere na simbiose planta-microorganismos, aumenta a pré-disposição a doenças fúngicas (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1984); induz à senescência pelo aumento da atividade da peroxidase e diminui o conteúdo de clorofila (JALIL, SELLES e CLARKE, 1994b; LAGRIFFLOUL *et al.*, 1998); reduz a área foliar (VÁSQUEZ, POSCHENRIEDER e BARCELÓ, 1989; JALIL, SELLES e CLARKE, 1994a,b); reduz os níveis de ATP e a atividade de ATPase (OBATA e UMEBAYASHI, 1997); interfere na nutrição das plantas (GUSSARSON, 1994; GUSSARSON *et al.*, 1996; YANG *et al.*, 1996; SIMON, 1998; NASCIMENTO, FONTES e NEVES, 1998; SOARES, 1999). Evidentemente, esses efeitos são mais pronunciados à medida que aumenta a concentração do metal pesado nos tecidos vegetais.

O cádmio é um metal pesado que está presente em muitas áreas, seja por ocorrência natural,

seja por introdução antropogênica. Esses ambientes necessitam ser recuperados e/ou utilizados de alguma forma, sendo, portanto, necessário conhecer quais espécies vegetais são capazes de desenvolverem-se em tais ambientes, pois a fitorremediação é, entre os métodos de recuperação de solos contaminados por metais pesados, a forma mais prática e barata de promovê-la. Dentre as espécies vegetais, as árvores e os arbustos surgem como alternativa para tal fim, pois não apresentam o risco de contaminar a cadeia alimentar. No entanto, o conhecimento sobre o comportamento de espécies lenhosas, quando submetidas a ambientes contaminados por metais pesados, tem sido restrito a espécies de clima temperado e pouco, ou quase nada, se conhece sobre as espécies florestais de clima tropical.

O clima tropical propicia a ocorrência natural de um grande número de espécies vegetais, apresentando uma diversidade biológica muito superior à apresentada em áreas sob clima temperado, sendo que, provavelmente, muitas dessas espécies apresentam potencial para desenvolverem-se em condições adversas, devendo-se dedicar esforços no sentido de selecionar tais espécies para que a recuperação de áreas degradadas, que apresentam contaminação por metais pesados, seja feita de forma criteriosa e com chances de sucesso.

O objetivo deste trabalho foi verificar o efeito da aplicação de doses crescentes de cádmio sobre o teor de nutrientes e de cádmio na raiz, no caule e nas folhas de mudas de cedro, cultivadas em solução nutritiva.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras – UFLA, utilizando-se de mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.), que foram produzidas em substrato contendo areia lavada e, quando apresentavam altura média de 5 cm ou dois pares de folhas definitivas, foram repicadas para bandejas plásticas com capacidade de 35 L, contendo solução nutritiva de Clark (CLARK, 1975), com a concentração de todos os nutrientes reduzida a 20%, com aeração constante em que permaneceram por 15 dias, quando a solução foi substituída e a concentração de todos os nutrientes foi elevada para 30% da normal. Ao final de 15 dias, as mudas foram individualizadas em vasos plásticos, com capacidade de 900 mL, contendo solução nutritiva a 50% a qual foi trocada a cada 10 dias. Após 20 dias, empregou-se solução normal, e decorridos mais 10 dias, adicionaram-se os tratamentos, ajustando o pH para 5,5.

O delineamento estatístico adotado foi o de blocos ao acaso, com cinco tratamentos e cinco repetições, sendo cada repetição representada por um vaso com uma planta, perfazendo assim um total de 25 plantas.

Os tratamentos consistiram na aplicação de doses crescentes de cádmio: 0, 22, 44, 88 e 132 μM , usando como fonte o cloreto de cádmio ($\text{CdCl}_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$). Na preparação de todas as soluções estoque dos nutrientes e do cádmio, empregaram-se reagentes PA. A solução nutritiva foi preparada, utilizando-se água deionizada e, durante o intervalo de renovação da solução, o volume dos vasos foi completado, sempre que necessário, utilizando-se também de água deionizada.

As plantas foram mantidas por 60 dias em exposição ao metal pesado, com renovação da solução nutritiva a cada 10 dias, mantendo-se o pH em 5,5 pela adição de HCl 0,1M, sendo a correção do pH feita a cada troca da solução nutritiva. Após esse período, procedeu-se à colheita das plantas, separando-as em raiz, caule e folhas.

As raízes, o caule e as folhas foram então lavadas em água destilada, postas a secar em estufa com circulação de ar a 65° C até peso constante. Determinou-se em balança de precisão (0,01g) o peso de matéria seca que, em seguida, foi moída em moinho tipo Wiley, equipado com peneira de 0,38 mm, para ser analisada quimicamente.

Após digestão nítrico-perclórica, os teores de Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn e Cd na raiz, no caule e nas folhas, foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. Os teores de P foram determinados por colorimetria, teores de S por turbidimetria e os de K por fotometria de chama (MALAVOLTA, VITTI e OLIVEIRA, 1997).

Os dados foram submetidos à análise de variância e ajustadas equações de regressão pelo programa estatístico SISVAR.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As equações de regressão ajustadas para o teor de macronutrientes em mudas de cedro, em relação às doses de cádmio aplicadas, mostram que houve efeito significativo desse metal pesado sobre a absorção de nutrientes (Tabela 1).

TABELA 1: Equações de regressão para os teores de macronutrientes na raiz, caule e folhas de mudas de cedro, em resposta a doses crescentes de cádmio.

NUTRIENTE	PARTE DA PLANTA	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	R ²
P	Raiz	$Y = 1,3 + 0,0089 X$	0,97
	Caule	$Y = 0,7 + 0,0392 X - 0,000234 X^2$	0,74
	Folha	$Y = 1,4 + 0,0138 X - 0,000086 X^2$	0,74
K	Raiz	$Y = 21,1$	0,75
	Caule	$Y = 22,4 + 0,0688 X$	
	Folha	$Y = 28,5$	
S	Raiz	$Y = 2,5 + 0,0773 X - 0,000517 X^2$	0,78
	Caule	$Y = 0,9 + 0,0371 X - 0,000199 X^2$	0,71
	Folha	$Y = 1,8$	
Ca	Raiz	$Y = 7,4$	0,74
	Caule	$Y = 10,0 + 0,0246 X$	
	Folha	$Y = 10,2 + 0,0966 X - 0,000663 X^2$	
Mg	Raiz	$Y = 4,4 - 0,0483 X + 0,000180 X^2$	0,84
	Caule	$Y = 3,1 + 0,0395 X - 0,000182 X^2$	0,80
	Folha	$Y = 2,6$	

Em que: Todos os coeficientes calculados para as equações de 1^o e 2^o grau foram significativos a 1% de probabilidade pelo teste F; R² = coeficiente de determinação.

A aplicação de Cd na solução nutritiva fez com que o teor de P na raiz, no caule e nas folhas aumentasse com as doses do metal. Na raiz, o teor de P aumentou de forma linear com as doses de Cd, sendo que a aplicação de 22 μM Cd, a menor dose aplicada, proporcionou um aumento de 15% no teor de P, ao passo que esse teor aumentou 90%, em relação ao tratamento controle, com a aplicação da maior dose testada (132 μM). Esse elevado teor de P na raiz pode possivelmente ter sido motivado por sua precipitação na forma de fosfato de cádmio, forma essa insolúvel, portanto, de baixo transporte. Esse aumento no teor radicular de P foi observado por outros autores, trabalhando com diferentes espécies de plantas (YANG *et al.*, 1996; SOARES, 1999), embora GUSSARSON (1994) tenha verificado que, em mudas de *Betula pendula*, houve redução no teor radicular de P com a aplicação de Cd em solução nutritiva. De acordo com KABATA-PENDIAS e PENDIAS (1984), a presença de Cd provoca antagonismo sobre a absorção de P. No caule e na folha, observou-se resposta quadrática negativa, com o teor de P aumentando até a dose 83,8 μM e 80,2 μM respectivamente, caindo a partir de então. Nesse ponto de máximo teor de P, verificou-se um aumento de 234% e 39,5%, em relação ao tratamento controle, no caule e nas folhas respectivamente.

A aplicação de doses crescentes de Cd não afetou o teor de K na raiz e nas folhas, sendo que, no caule, houve uma resposta linear positiva. No entanto, esse aumento, no teor caulinar de K, não foi de grande magnitude, uma vez que, com a aplicação da menor dose de Cd (22 μM), houve aumento de 6,8%, enquanto a maior dose (132 μM) provocou um aumento de 40,5% no teor de K, em relação ao tratamento controle. A ausência de efeito significativo do Cd, sobre o teor de K na raiz e nas folhas, está de acordo com os resultados obtidos por WALLACE *et al.* (1977), ASP *et al.* (1994), SIMON (1998) e LAGRIFFOUL *et al.* (1998). No entanto, na raiz e na parte aérea de *Betula pendula* (GUSSARSON, 1994; GUSSARSON *et al.*, 1996) e de trigo (JALIL, SELLES e CLARKE, 1994a), houve redução no teor de K com a aplicação de Cd, ao passo que, em feijão, foi observado uma maior concentração de K nas raízes e na parte aérea de plantas tratadas com Cd (VÁSQUEZ, POSCHENRIEDER e BARCELÓ, 1989). Esses dados mostram que a resposta das plantas à aplicação de Cd é muito variável, dependendo da espécie.

Na raiz e no caule das mudas de cedro, o teor de S apresentou resposta quadrática negativa, alcançando um ponto de máximo nas doses 74,7 μM e 93,2 μM Cd respectivamente. Nesse ponto de máximo, os teores de S apresentaram um aumento de 115,6% e 192,1% respectivamente em relação ao tratamento controle. Na folha, o teor de S não foi afetado significativamente pela aplicação de Cd. De acordo com KABATA-PENDIAS e PENDIAS (1984), a presença de metais pesados, como o Cd, não exerce qualquer efeito sobre a absorção de S. A síntese de fitoquelatinas é induzida pela presença de Cd (BRUNE, URBACH e DIETZ, 1995), sendo este um possível mecanismo de tolerância das plantas a esse metal pesado. Um aumento na produção de grupos tiólicos, precursores das fitoquelatinas, pode possivelmente ser o responsável por tal aumento no teor de S principalmente na raiz.

O teor radicular de Ca não foi afetado significativamente pelas doses de Cd, concordando com os resultados obtidos por WALLACE *et al.* (1977), trabalhando com feijão e por SIMON (1998), trabalhando com girassol; no entanto, esses trabalhos discordam das observações de GUSSARSON (1994) e GUSSARSON *et al.* (1996), trabalhando com *Betula pendula*, em que o

teor radicular de Ca diminuiu com a aplicação de Cd. Por outro lado, em mudas de eucalipto, submetidas a doses crescentes de Cd, houve um aumento na concentração de Ca na raiz (SOARES, 1999). No caule, o teor de Ca apresentou resposta linear positiva, enquanto que nas folhas houve resposta quadrática negativa, com o teor de Ca alcançando um máximo, quando da aplicação de 72,8 μM Cd, caindo a partir de então.

O teor de Mg apresentou comportamento diferenciado com a parte da planta. Assim, na raiz houve resposta quadrática positiva; no caule, a resposta foi quadrática negativa e nenhum efeito significativo foi observado nas folhas. Na raiz, o teor de Mg sofreu redução com a aplicação das doses de Cd, sendo que esse teor alcançou um mínimo de 1,16 g kg^{-1} , valor esse considerado dentro de limites normais em plantas que são de 1 a 5 g kg^{-1} (BERGMANN, 1992). Redução no teor de Mg na raiz, provocada por Cd, foi observada em *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus maculata* (SOARES, 1999), em repolho, milho, azevém e trevo branco (YANG *et al.*, 1996) e em *Betula pendula* (GUSSARSON, 1994). Esse efeito do metal pesado sobre o teor de magnésio pode ser por causa do efeito de competição de outros íons durante o processo de absorção (MARSCHNER, 1995), muitas vezes, caracterizado como antagonismo (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1984). No entanto, em girassol (SIMON, 1998), feijão (WALLACE *et al.*, 1977) e milho (LAGRIFFOUL *et al.*, 1998), não houve efeito significativo da presença de Cd sobre o teor de Mg.

Ao analisar o comportamento do teor de micronutrientes em diferentes partes das mudas de cedro submetidas a doses crescentes de Cd, verifica-se que as equações de regressão ajustadas mostram que tais doses afetaram os teores (Tabela 2).

TABELA 2: Equações de regressão para os teores de micronutrientes e de cádmio na raiz, caule e folhas de mudas de cedro, em resposta a doses crescentes de cádmio.

NUTRIENTE	PARTE DA PLANTA	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	R ²
Cu	Raiz	$Y = 33,6 + 0,3630 X$	0,92
	Caule	$Y = 2,6 + 0,0232 X$	0,93
	Folha	$Y = 3,4 - 0,0214 X + 0,000214 X^2$	0,75
Fe	Raiz	$Y = 108 + 55,54 X$	0,90
	Caule	$Y = 51 - 0,4598 X + 0,004448 X^2$	0,85
	Folha	$Y = 122 + 0,3099 X$	0,98
Mn	Raiz	$Y = 928 - 12,2055 X + 0,072504 X^2$	0,80
	Caule	$Y = 58 - 0,4451 X + 0,003254 X^2$	0,90
	Folha	$Y = 64 + 0,7719 X - 0,005662 X^2$	0,53
Zn	Raiz	$Y = 246 - 0,9208 X$	0,84
	Caule	$Y = 33 + 0,8720 X - 0,004879 X^2$	0,82
	Folha	$Y = 36 - 0,2315 X + 0,001503 X^2$	0,57
Cd	Raiz	$Y = 424 + 65,37X - 0,252684 X^2$	0,89
	Caule	$Y = 240,73 + 12,66 X$	0,91
	Folha	$Y = 12 + 8,02 X - 0,054038 X^2$	0,89

Em que: Todos os coeficientes calculados para as equações de 1^o e 2^o grau foram significativos a 1% de probabilidade pelo teste F; R² = coeficiente de determinação.

Na raiz e no caule das mudas, o teor de cobre aumentou de forma linear com a aplicação de

doses crescentes de Cd. A aplicação da menor dose (22 μM Cd) proporcionou um aumento de 23,8% e 19,6%, em relação ao tratamento controle, na raiz e no caule, respectivamente. KABATA-PENDIAS e PENDIAS (1984) afirmam que a presença de Cd provoca interação com a absorção de Cu, podendo, em algumas espécies, ser antagônica e, em outras, ser sinérgica, sendo que, no presente caso, a interação foi sinérgica, podendo esse fato ser um efeito secundário em consequência de danos na membrana plasmática. OBATA e UMEBAYASHI (1997) dizem que o Cd induz um aumento no teor radicular de Cu em diferentes espécies, porém, inibe seu transporte para a parte aérea. A afirmação desses últimos autores parece ser o que ocorreu no presente caso, quando o teor radicular aumentou de forma linear enquanto o teor foliar foi decrescente até a dose 50 μM Cd, mostrando que, com base nessa concentração de Cd na solução nutritiva, não há mais restrição de transporte de Cu para a parte aérea. Em *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus maculata*, SOARES (1999) observou que a concentração de Cu, na parte aérea, diminuiu com as menores doses de Cd, ao passo que essa concentração aumentou com o crescimento das doses. Em *Betula pendula*, houve um incremento na concentração de Cu na raiz e uma redução na parte aérea com o aumento das dose de Cd de 0 a 2 μM , mostrando que, até essa dose (2 μM), o Cd era eficiente em reduzir o transporte de Cu para a parte aérea (GUSSARSON *et al.*, 1996).

O teor de Fe, na raiz e nas folhas das mudas de cedro, apresentou resposta linear positiva, sendo que, de acordo com KABATA-PENDIAS e PENDIAS (1984), o Cd pode exercer efeito antagônico ou sinérgico sobre a absorção de Fe, sendo que, no presente caso, o efeito foi sinérgico. Esse aumento, no teor de Fe na raiz e nas folhas, pode ser atribuído ao efeito concentração, pois houve redução no crescimento das plantas (PAIVA, CARVALHO e SIQUEIRA, 2000). Em mudas de eucalipto, SOARES (1999) verificou que a presença de Cd promoveu aumento no teor de Fe nas raízes, no entanto, reduziu esse teor na parte aérea, quando da aplicação das menores doses.

As mudas de cedro apresentaram resposta quadrática positiva à aplicação de Cd sobre o teor de Mn na raiz, atingindo-se um teor mínimo de 414 mg kg^{-1} , representando uma redução de 55,4%, em relação ao tratamento controle, indicando haver antagonismo entre Mn e Cd (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1984). No caule, ao aplicar o Cd, a resposta foi quadrática positiva, alcançando um mínimo de 42,8 mg kg^{-1} , na dose 68 μM Cd, 26% inferior ao tratamento controle. Já nas folhas, a resposta foi quadrática negativa, alcançando um máximo na dose 68,2 μM Cd, correspondendo a um aumento de 41,1%, em relação ao tratamento controle, diminuindo a partir daí. Verifica-se, pelos dados obtidos, que o efeito principal do Cd foi sobre o teor radicular de Mn, seguido pelo efeito no teor caulinar e, em menor escala, sobre o teor foliar. Redução na absorção de Mn foi observada em diferentes espécies, com a aplicação de Cd (WALLACE *et al.*, 1977; GUSSARSON, 1994; GUSSARSON *et al.*, 1996; YANG *et al.*, 1996; SOARES, 1999).

A aplicação de Cd, em mudas de cedro, fez com que o teor de Zn na raiz tivesse resposta linear negativa, mostrando o antagonismo entre esses metais, em termos de absorção, conforme preconizado por KABATA-PENDIAS e PENDIAS (1984). Em várias espécies, a absorção de Zn foi reduzida pela presença de Cd (JALIL, SELLES e CLARKE, 1994a; YANG *et al.*, 1996; NASCIMENTO, FONTES e NEVES, 1998; SOARES, 1999). No caule, o Cd provocou resposta quadrática negativa sobre o teor de Zn, apresentando um máximo teor quando da aplicação de 89,4

μM , ponto em que o teor caulinar de Zn foi 118,1% superior ao apresentado pelo tratamento-controle. Nas folhas, as mudas de cedro apresentaram resposta quadrática positiva à aplicação de Cd, com um teor mínimo de 27 mg kg^{-1} , na dose $77 \mu\text{M Cd}$, correspondendo a 75% do tratamento-controle. Nas folhas de plantas de feijão, WALLACE *et al.* (1977) também verificaram uma redução no teor foliar de Zn até a aplicação de $100 \mu\text{M Cd}$, em solução nutritiva. O comportamento apresentado pelo teor de Zn nas mudas de cedro reflete bem a dificuldade de identificar espécies tolerantes a metais pesados, pois o teor diminuiu linearmente na raiz, aumentou até certa dose no caule e reduziu também, até certa dose, nas folhas, ou seja, o comportamento foi distinto entre as partes da planta. Deve-se ainda considerar o fato de que a resposta também é diferenciada com as espécies.

A presença de doses crescentes de Cd, em solução nutritiva, fez com que o teor desse elemento aumentasse na raiz, no caule e na folha das mudas de cedro. Resposta quadrática negativa foi observada para o teor de Cd na raiz e na folha, enquanto resposta linear positiva foi observada para o teor de Cd no caule. O máximo alcançado pelo teor de Cd, na raiz das mudas de cedro, foi $8.882,9 \text{ mg kg}^{-1}$, na dose de $129,4 \mu\text{M Cd}$, correspondendo a um aumento de 1.995%, em relação ao controle. Esse comportamento confirma resultados anteriores de que a presença de Cd aumenta com a concentração desse elemento no meio de crescimento (Smith e Brennam, 1984; Jalil, Selles e Clarke, 1994b; Soares, 1999). O teor de Cd na folha das mudas de cedro, alcançou o máximo de $309,6 \text{ mg kg}^{-1}$, na dose $74,2 \mu\text{M Cd}$, valor correspondente a um aumento de 2.480,0% em relação ao tratamento controle. O aumento no teor de Cd, no caule e nas folhas das mudas, indica o elevado potencial de translocação desse elemento. Resultados semelhantes foram obtidos por diferentes autores (Florijn e Van Beusichem, 1993a, b; Guo e Marschner, 1995; Arduini, Godbold e Onnis, 1996; Soares, 1999). Esses elevados teores de Cd, na raiz, no caule e na folha, podem ser os responsáveis pelo elevado grau de toxicidade desse elemento, pois os valores alcançados são muito superiores à faixa de 5 a 30 mg kg^{-1} , considerada potencialmente tóxica para plantas (Kabata-Pendias e Pendias, 1984).

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem concluir que:

Em mudas de cedro, a aplicação de Cd promove um aumento no teor de P, S e Ca, praticamente não afetando o teor de K, ao passo que o teor de Mg apresenta resultados inconsistentes com a parte da planta analisada;

Quanto aos micronutrientes, a aplicação de Cd promove um aumento no teor de Cu e Fe e uma redução no teor de Mn e Zn na raiz; no caule há um aumento no teor de Cu e Zn e uma redução no teor de Fe e Mn, ao passo que nas folhas, há um aumento no teor de Fe e uma redução no teor de Cu, Mn e Zn;

O Cd afeta principalmente o teor de micronutrientes em mudas de cedro;

O teor de Cd, na raiz, caule e folha de mudas de cedro, aumenta com a dose do elemento no meio de crescimento;

O Cd é um metal pesado que apresenta grande translocação em mudas de cedro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLOWAY, B.J. Cadmium. In: ALLOWAY, B.J. (Ed.). **Heavy metals in soils**. New York: J. Willey, 1990. p.100-121.
- AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; COSTA, L.M.; OLIVEIRA, C.; VELLOSO, A.C.X. Heavy metals in fertilizers and liming materials in the State of Minas Gerais. In: ANNUAL CONFERENCE ON TRACE SUBSTANCES IN ENVIRONMENTAL HEALTH, 25., 1991. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 1992. p.95-103.
- ARDUINI, I.; GODBOLD, D.L.; ONNIS, A. Cadmium and copper uptake and distribution in Mediterranean tree seedlings. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.97, n.1, p.111-117, May 1996.
- ASP, H.; GUSSARSON, M.; ADALSTEINSSON, S. et al. Control of potassium influx in roots of birch (*Betula pendula*) seedlings exposed to cadmium. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.45, n.291, p.1823-1827, Dec. 1994.
- BERGMANN, W. **Nutritional disorders of plants: developments, visual and analytical diagnosis**. New York: Gustav Fischer Verlag Jena, 1992. 741p.
- BOON, D.Y.; SOLTANPOUR, P.N. Lead, cadmium, and zinc contamination of aspen garden soils and vegetation. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.21, n.1, p.82-86, Jan./Mar. 1992.
- BRUNE, A.; URBACH, W.; DIETZ, K.J. Differential toxicity of heavy metals is partly related to a loss of preferential extraplasmic compartmentation: a comparison of C-, Mo-, Ni- and Zn-stress. **The New Phytologist**, New York, v.129, n.3, p.403-409, Mar. 1995.
- CHRISTENSEN, T.H. Cadmium soil sorption at low concentrations: VIII - Correlation with soil parameters. **Water, Air, And Soil Pollution**, Dordrecht, v.44, n.1, p.71-82, 1989.
- CLARK, R.B. Characterization of phosphatase of intact maize roots. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Washington, v.23, n.3, p.458-460, 1975.
- FLORIJN, P.J.; VAN BEUSICHEM, M.L. Cadmium distribution in maize inbred lines: effects of pH and level of Cd supply. **Plant and Soil**, London, v.153, n.1, p.79-84, June 1993a.
- FLORIJN, P.J.; VAN BEUSICHEM, M.L. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines. **Plant and Soil**, London, v.150, n.1, p.25-32, Mar. 1993b.
- GUO, Y.; MARSCHNER, H. Uptake, distribution, and binding of cadmium and nickel in different plant species. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.18, n.12, p.2691-2706, Dec. 1995.
- GUSSARSON, M. Cadmium-induced alterations in nutrient composition and growth of *Betula pendula* seedlings: the significance of fine roots as a primary target for cadmium toxicity. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.17, n.12, p.2151-2163, Nov. 1994.
- GUSSARSON, M.; ASP, H.; ADALSTEINSSON, S.; JENSÉN, P. Enhancement of cadmium effects on growth and nutrient composition of birch (*Betula pendula*) by buthionine sulfoximine (BSO). **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.47, n.295, p.211-215, Feb. 1996.
- JALIL, A.; SELLES, F.; CLARKE, J.M. Effect of cadmium on growth and the uptake of cadmium and other elements by durum wheat. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.17, n.11, p.1839-1858, Oct. 1994a.
- JALIL, A.; SELLES, F.; CLARKE, J.M. Growth and cadmium accumulation in two durum wheat cultivars. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.25, n.15/16, p.2597-2611, Sept. 1994b.

- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 1984. 315p.
- LAGENBACH, T.; SERPA, M. Teor de cádmio nos fertilizantes fosfatados brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.9, n.3, p.179-181, set./dez. 1985.
- LAGERWERFF, J.V. Lead, mercury, and cadmium as environmental contaminants. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M.; LINDSAY, W.L. (Eds.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p. 593-636.
- LAGRIFFOUL, A.; MOCQUOT, B.; MENCH, M. et al. Cadmium toxicity effects on growth, mineral and chlorophyll content and activities of stress related enzymes in young maize plants (*Zea mays* L.) **Plant and Soil**, London, v.200, n.1, p.241-250, Mar. 1998.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995. 889p.
- NASCIMENTO, C.W.A.; FONTES, L.R.F.; NEVES, J.C.L. Mineral composition of two Brazilian corn cultivars as a function of cadmium in the nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.21, n.11, p.2369-2379, Nov. 1998.
- OBATA, H.; UMEBAYASHI, M. Effects of cadmium on mineral nutrient concentrations in plants differing tolerance for cadmium. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.20, n.1, p.97-105, Jan. 1997.
- OLSEN, S.R. Micronutrients interactions. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M.; LINDSAY, W.L. (Eds.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p.243-264.
- PAIVA, H.N.; CARVALHO, J.G.; SIQUEIRA, J.O. Efeito de Cd, Ni, Pb e Zn sobre mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standley) em solução nutritiva. **Revista Árvore**, Viçosa, v.24, n.4, p.369-378, 2000.
- POTSCH, C. **Mineralogia**. Rio de Janeiro: Livraria São José, 1967. 337p.
- SIMON, L. Cadmium accumulation and distribution in sunflower plant. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.21, n.2, p.341-352, Feb. 1998.
- SMITH, G.C.; BRENNAN, E. Response of silver maple seedlings to an acute dose of root applied cadmium. **Forest Science**, Bethesda, v.30, n.3, p.582-586, Sept. 1984.
- SOARES, C.R.F.S. **Toxidez de zinco, cobre, cádmio e chumbo para o eucalipto em solução nutritiva**. Lavras: UFLA, 1999. 132p. Dissertação. (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, 1999.
- VÁSQUEZ, M.D.; POSCHENRIEDER, C.; BARCELÓ, J. Pulvinus structure and leaf abscission in cadmium-treated bean plants (*Phaseolus vulgaris*). **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v.67, n.9, p.2756-2764, Sept. 1989.
- WALLACE, A.; ROMNEY, E.M.; ALEXANDER, G.V. et al. Some interactions in plants among cadmium, other heavy metals, and chelating agents. **Agronomy Journal, Madison**, v.69, n.1, p.18-20, Jan./Feb. 1977.
- YANG, X.; BALIGAR, V.C.; MARTENS, D.C. et al. Cadmium effects on influx and transport of mineral nutrients in plant species. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.19, n.3-4, p.643-656, Mar./Apr. 1996.