

TEOR, CONTEÚDO E ÍNDICE DE TRANSLOCAÇÃO DE NUTRIENTES EM MUDAS DE CEDRO (*Cedrela fissilis* VELL.) SUBMETIDAS A DOSES CRESCENTES DE ZINCO¹

CONTENT, ACCUMULATION AND TRANSLOCATION INDEX OF NUTRIENTS IN SEEDLINGS OF CEDRO (*Cedrela fissilis* VELL.) SUBMITTED TO INCREASING LEVELS OF ZINC

Haroldo Nogueira de Paiva² Janice Guedes de Carvalho³
José Oswaldo Siqueira⁴ João Batista Donizeti Corrêa⁵

RESUMO

Com o objetivo de avaliar os efeitos de doses crescentes de Zn sobre o teor, o conteúdo e o índice de translocação de nutrientes, mudas de cedro foram conduzidas em solução nutritiva de Clark, em condições de casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, e submetidas a doses crescentes de Zn: 2, 76, 152, 304 e 456 $\mu\text{mol L}^{-1}$, adotando-se para tal um delineamento estatístico de blocos ao acaso. Ao final de 60 dias de exposição ao metal pesado, foram feitas avaliações do teor e do conteúdo de macro e de micronutrientes na matéria seca de raiz, caule, folhas, parte aérea e total, bem como da translocação desses nutrientes da raiz para a parte aérea. Os resultados mostram que, de maneira geral, há resposta diferenciada nos teores e redução no conteúdo de macro e de micronutrientes, independente da parte da planta analisada, ao passo que o índice de translocação de nutrientes é crescente com as doses de Zn aplicadas.

Palavras-chave: espécie florestal nativa, metal pesado, nutrição de plantas.

ABSTRACT

The aim of this work was to evaluate the effects of the increasing levels of Zn on cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) seedlings. The experiment was conducted in Clark nutrient solution, in a greenhouse of the Soil Science Department of the Federal University of Lavras. The plants were submitted to increasing levels of Zn: 2, 76, 152, 304 e 456 $\mu\text{mol L}^{-1}$, in randomized blocks statistical design. At the end of 60 days of growth, evaluations were made of macro and micronutrients content and accumulation in the root, stem, leaf, shoot and total dry matter. It was also estimated a translocation index of these nutrients. The results show that, in a general way, there was different response to content and reduction in the macro and micronutrients accumulation, independent of the part of the plant analyzed, while the translocation index was increasing with the levels of applied Zn.

Key words: native forest species, heavy metal, plant nutrition.

INTRODUÇÃO

A crescente industrialização tem levado à contaminação de solos por diferentes metais pesados, sendo que esses solos passam a apresentar problemas para o desenvolvimento normal de muitas espécies de plantas, bem como para a própria microbiota do solo. Além desta industrialização, outros fatores, tais como o uso de lodo de esgoto, a aplicação de rejeitos industriais, pesticidas, bem como composto orgânico de lixo urbano são fontes potenciais de fornecimento antrópico de diferentes elementos que são, ou podem tornar-se tóxicos para plantas e animais. Dentre esses elementos, o zinco apresenta-se como um elemento potencialmente tóxico, desde que presente em concentrações excessivas.

Em concentrações elevadas, o Zn interfere na nutrição das plantas, afetando inclusive a translocação

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 Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, CEP 37200-000, Lavras (MG). janicegc@ufla.br
4. Engenheiro Agrônomo, PhD., Professor Titular do Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, CEP 37200-000, Lavras (MG). siqueira@ufla.br
5. Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor Adjunto do Departamento de Agricultura, Universidade Federal de Lavras, CEP 37200-000, Lavras (MG). correa@ufla.br

Recebido para publicação em 24/04/2002 e aceito em 25/11/2002.

de nutrientes. Em raiz de cevada, quando o nível de Zn na solução aumentou de 2 a 1.600 $\mu\text{mol L}^{-1}$, houve aumento no conteúdo de P, diminuição nos conteúdos de Mn e Mg, ao passo que os conteúdos de K, Ca, Fe e B permaneceram inalterados. Nas folhas, novamente o conteúdo de P aumentou e o de Fe diminuiu (Brune *et al.*, 1994). Em *Eucalyptus maculata* e em *Eucalyptus urophylla*, Soares *et al.* (2001) verificaram que, de maneira geral, os conteúdos de Cu, Fe e Mn sofreram redução de seus valores com a elevação de Zn em solução.

Estudos realizados sobre o comportamento de espécies florestais nativas nos trópicos, quando submetidas a ambientes contaminados por metais pesados, são escassos, sendo que muitas destas espécies são potenciais para diferentes usos futuros de sua madeira. Uma vez conhecidas espécies lenhosas tropicais capazes de desenvolverem-se em solos ricos em metais pesados, estas se tornam em alternativa atraente para a recuperação e/ou utilização econômica de tais solos, ressaltando-se o aspecto de que tais metais ficarão retidos em seus tecidos por um longo período de tempo, não correndo o perigo de contaminação da cadeia alimentar.

O cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) é uma espécie florestal que produz madeira largamente empregada em compensados, contraplacados, esculturas e obras de arte, marcenaria, construção civil, naval e aeronáutica, na confecção de pequenas caixas, lápis e instrumentos musicais, etc (Lorenzi, 1992). Essa espécie foi considerada por Marques *et al.* (2000) como potencial para a revegetação de locais contaminados por metais pesados, tendo seu crescimento pouco afetado em estudos com solos multicontaminados.

Os objetivos do presente trabalho foram verificar o efeito de doses crescentes de zinco, em solução nutritiva, sobre o teor, o conteúdo e a translocação de macro e de micronutrientes em mudas de cedro.

MATERIAL E MÉTODO

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras – UFLA, utilizando-se mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) que foram produzidas em substrato contendo areia lavada. 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, na qual 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 dez dias. Após vinte dias, empregou-se solução completa, e decorridos mais dez dias adicionaram-se os tratamentos, ajustando o pH para 5,5.

Os tratamentos consistiram na aplicação de doses crescentes de zinco: 2, 76, 152, 304 e 456 $\mu\text{mol L}^{-1}$ usando como fonte o sulfato de zinco ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). A concentração de Zn, na solução nutritiva de Clark é de 2 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Na preparação de todas as soluções estoque dos nutrientes e do zinco, empregaram-se reagentes p.a.. 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.

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.

As plantas foram mantidas por sessenta dias em solução com metal pesado (ocasião em que as plantas submetidas a doses mais elevadas começaram a morrer), com renovação desta a cada dez dias, mantendo-se o pH em 5,5 pela adição de NaOH ou HCl 0,1 mol L^{-1} . Após esse período, procedeu-se à colheita das plantas, separando-as em raiz, caule e folhas.

As raízes, caules e folhas foram então lavadas em água destilada e 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 e Zn 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 *et al.*, 1997).

Os conteúdos de P, K, S, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn e Zn, na raiz, no caule e nas folhas, foram calculados com base nos teores e nas produções de matéria seca.

De posse dos conteúdos dos vários nutrientes, na parte aérea e no sistema radicular, segundo os tratamentos, calcularam-se os índices de translocação (IT) dos elementos, de acordo com Abichequer e Bohnen (1998) da seguinte forma:

$$IT = (\text{Conteúdo do elemento na parte aérea})/(\text{Conteúdo do elemento na planta}) \times 100$$

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teor de nutrientes

As mudas de cedro, submetidas a doses crescentes de zinco, em solução nutritiva, apresentaram respostas diferenciadas de acordo com a parte da planta analisada e o nutriente em estudo. Dessa forma, para os macronutrientes (Tabelas 1 e 2), verifica-se que o teor de P na matéria seca de raiz e de caule apresenta aumento linear com as doses de Zn, ao passo que o teor foliar apresenta resposta quadrática negativa, aumentando esse teor até a dose 350 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Zn, com redução neste em doses mais elevadas.

TABELA 1: Equações de regressão para os teores de macronutrientes (Y), na raiz, caule e folhas de mudas de cedro, em resposta a diferentes doses de zinco (X).

TABLE 1: Regression equations of macronutrients content (Y) in the root, stem and leaves of the cedro seedlings, in response to increasing levels of zinc (X).

Nutrientes	Parte da Planta	Equação de Regressão	R ²
P	Raiz	$Y = 1,4 + 0,00202X$	0,74
	Caule	$Y = 0,7 + 0,0017X$	0,94
	Folha	$Y = 1,3 + 0,0021X - 0,000003X^2$	0,86
K	Raiz	$Y = 20,4 + 0,0188X - 0,000070X^2$	0,85
	Caule	$Y = 19,1 + 0,0131X$	0,80
	Folha	Y = n.s.	
S	Raiz	Y = n.s.	
	Caule	$Y = 0,9 - 0,0024X + 0,000006X^2$	0,71
	Folha	Y = n.s.	
Ca	Raiz	$Y = 8,3 - 0,0062X$	0,74
	Caule	$Y = 10,0 - 0,0293X + 0,000059X^2$	0,93
	Folha	$Y = 11,3 - 0,0044X$	0,98
Mg	Raiz	$Y = 4,5 - 0,0154X + 0,000023X^2$	0,95
	Caule	$Y = 2,6 - 0,0049X + 0,000011X^2$	0,88
	Folha	Y = n.s.	

Em que: Todos os coeficientes das equações de regressão são significativos a 1% de probabilidade pelo teste F; n.s. = não significativo.

O aumento no teor radicular de P, da ordem de 10,96% e 65,79%, em relação ao tratamento controle, quando da aplicação da menor dose (76 $\mu\text{mol L}^{-1}$) e da maior dose (456 $\mu\text{mol L}^{-1}$), respectivamente, pode ter sido provocado por uma precipitação deste nutriente com o zinco, na forma de fosfato de zinco, uma vez que, segundo Kabata-Pendias e Pendias (1984), o excesso de metais pesados no meio de crescimento das plantas pode provocar esta precipitação do P. Resultados semelhantes foram observados por Soares *et al.* (2001), trabalhando com *Eucalyptus* e por Brune *et al.* (1994), trabalhando com cevada.

Em relação ao teor de K, verifica-se que na matéria seca de raiz este apresentou resposta quadrática

negativa, induzindo a sua absorção até a dose $134 \mu\text{mol L}^{-1}$ Zn, inibindo-a em doses mais elevadas. No caule, houve aumento no teor de K com a aplicação de doses crescentes de Zn, enquanto nenhum efeito significativo foi observado para o teor foliar desse nutriente.

TABELA 2: Teores médios de macronutrientes na matéria seca de raiz, caule e folha de mudas de cedro (g kg^{-1}), submetidas a doses crescentes de zinco.

TABLE 2: Macronutrients content in root, stem and leave dry matter of cedro seedlings (g kg^{-1}), submitted to increasing levels of zinc.

Nutrientes	Parte da Planta	Doses de Zinco ($\mu\text{mol L}^{-1}$)				
		2	76	152	304	456
P	Raiz	1,34	1,51	2,17	2,10	2,30
	Caule	0,70	0,88	1,03	1,12	1,59
	Folha	1,25	1,44	1,63	1,58	1,71
K	Raiz	19,64	23,46	20,40	19,72	14,48
	Caule	18,30	19,56	22,50	24,30	23,96
	Folha	29,10	25,44	26,16	25,38	26,40
S	Raiz	2,32	1,95	2,34	1,89	2,30
	Caule	0,90	0,71	0,90	0,65	1,28
	Folha	1,50	1,41	1,48	1,39	1,63
Ca	Raiz	8,83	6,34	7,96	7,12	5,44
	Caule	10,21	8,12	6,44	7,09	8,80
	Folha	11,25	11,08	10,48	9,86	9,29
Mg	Raiz	4,72	3,13	2,64	2,11	2,03
	Caule	2,54	2,22	2,23	2,01	2,76
	Folha	2,81	2,69	2,91	2,99	2,76

A resposta de mudas de cedro, em termos de teores de S, à aplicação de doses crescentes de Zn, mostrou que esse aumento nas doses de Zn não afetou significativamente o teor radicular e foliar de S, ao passo que o teor caulinar apresentou resposta quadrática positiva. Pouca influência de doses crescentes de Zn, em solução nutritiva, sobre o teor de S também foi observada por Soares *et al.* (2001) em mudas de eucalipto.

Quanto ao cálcio e ao magnésio, verificou-se que os teores destes apresentaram tendência de queda com o aumento das doses de Zn. De acordo com Marschner (1995), cátions divalentes, como o Zn^{+2} , competem com outros cátions, como o Ca^{+2} e o Mg^{+2} , muitas vezes, caracterizado como antagonismo (Kabata-Pendias e Pendias, 1984). Comportamento semelhante foi observado por Marques (1996) trabalhando com várias espécies arbóreas, em solo multi-contaminado, e por Soares *et al.* (2001) trabalhando com eucalipto, em solução nutritiva.

A aplicação da menor dose de zinco ($76 \mu\text{mol L}^{-1}$) provocou uma redução de 5,68 % e 2,96 % no teor radicular e foliar de Ca respectivamente, ao passo que a maior dose aplicada ($456 \mu\text{mol L}^{-1}$) proporcionou uma redução de 34,06% e 17,55% no teor radicular e foliar de Ca respectivamente, em relação ao tratamento controle.

O teor de micronutrientes, na matéria seca de raiz, caule e folhas de plantas de cedro, foi afetado de forma significativa pela aplicação de zinco em solução nutritiva, com exceção do teor caulinar de Mn que não foi afetado significativamente (Tabelas 3 e 4). De maneira geral houve aumento nos teores de Cu e Zn e redução no teores de Fe e Mn.

O Zn, considerado como antagonístico ao Cu (Kabata-Pendias e Pendias, 1984), exerceu efeito sinérgico sobre a absorção de Cu, elevando o teor radicular desse nutriente até a dose de $305 \mu\text{mol L}^{-1}$ Zn, passando então a ser antagonístico em doses superiores. O teor radicular de Fe sofreu redução até a aplicação de $143 \mu\text{mol L}^{-1}$ Zn, mostrando que, até esta dose, o Zn exerce antagonismo sobre a absorção de Fe. No caule, os teores de Cu e de Fe apresentaram resposta quadrática positiva ou raiz-quadrática positiva ao Zn, caindo com as menores doses e aumentando em doses maiores, indicando que, até determinada dose do

metal, há restrição do transporte de Cu e Fe da raiz para a parte aérea. Na folha, as mudas de cedro apresentaram aumento no teor de Fe, podendo este fato ser atribuído ao efeito concentração.

TABELA 3: Equações de regressão para os teores de micronutrientes (Y), na raiz, caule e folhas de mudas de cedro, em resposta a diferentes doses de zinco (X).

TABLE 3: Regression equations for micronutrients content (Y) in the root, stem and leaves of the cedro seedlings, in response to increasing levels of zinc (X).

Nutrientes	Parte da Planta	Equação de Regressão	R ²
Cu	Raiz	$Y = 28,9 + 0,1175X - 0,000192X^2$	0,82
	Caule	$Y = 1,94 - 0,0035X + 0,000011X^2$	0,81
	Folha	$Y = 1,4 + 0,0071X$	0,81
Fe	Raiz	$Y = 5209 - 443,60X^{0,5} + 18,5157X$	0,95
	Caule	$Y = 58 - 4,0666X^{0,5} + 0,170894X$	0,94
	Folha	$Y = 114 - 0,2173X + 0,000684X^2$	0,93
Mn	Raiz	$Y = 601 - 3,2452X + 0,005580X^2$	0,83
	Caule	Y = n.s.	-
	Folha	$Y = 57 - 0,0205X$	0,78
Zn	Raiz	$Y = 575 + 34,48X - 0,059406X^2$	0,97
	Caule	$Y = 41 + 2,2593X$	0,94
	Folha	$Y = 155 + 5,7092X - 0,008299X^2$	0,83

Em que: Todos os coeficientes das equações de regressão são significativos a 1 % de probabilidade pelo teste F; n.s. = não significativo.

As mudas de cedro apresentaram resposta quadrática positiva à aplicação de Zn sobre o teor de Mn na raiz, atingindo-se um teor mínimo de 129 mg kg⁻¹, representando uma redução de 78,5 %, em relação ao tratamento controle. Redução na absorção de Mn foi observada com a aplicação de Zn em plantas de cevada (Brune *et al.*, 1994). O teor caulinar de Mn não foi afetado significativamente pelas doses crescentes de Zn, ao passo que o teor foliar apresentou resposta linear negativa.

TABELA 4: Teores médios de micronutrientes na matéria seca de raiz, caule e folha de mudas de cedro (mg kg⁻¹), submetidas a doses crescentes de zinco.

TABLE 4: Micronutrients content in root, stem and leaf dry matter of cedro seedlings (mg kg⁻¹), submitted to increasing levels of zinc.

Nutrientes	Parte da Planta	Doses de Zinco (μmol L ⁻¹)				
		2	76	152	304	456
Cu	Raiz	26,04	43,70	40,60	43,14	44,04
	Caule	1,82	1,84	1,84	1,62	2,68
	Folha	0,60	2,92	2,48	3,46	4,54
Fe	Raiz	5284,00	2374,90	2842,90	3237,50	4057,30
	Caule	58,30	32,00	34,40	41,80	46,60
	Folha	120,20	94,10	93,60	119,70	154,50
Mn	Raiz	675,20	264,30	245,60	198,70	254,10
	Caule	62,80	44,70	49,10	51,00	51,10
	Folha	56,20	59,20	52,60	50,50	48,60
Zn	Raiz	282,50	3296,30	4493,30	5143,70	4075,20
	Caule	44,90	76,00	534,60	761,10	1022,80
	Folha	31,90	641,40	1010,50	880,70	1117,50

O teor de Zn apresentou resposta quadrática negativa na matéria seca de raiz e de folha e, no caule, a resposta foi linear positiva. Na raiz, o teor de Zn atingiu o máximo de 5.578 mg kg⁻¹, na dose 290 μmol L⁻¹ Zn, valor este 9,7 vezes superior ao tratamento controle. Em cevada, o teor radicular de Zn aumentou 250 vezes quando o nível de Zn na solução passou de 2 para 1.600 μmol L⁻¹ Zn (Brune *et al.*, 1994). Em eucalipto, o teor radicular de Zn passou de 333,73 mg kg⁻¹ no tratamento controle, para um teor de 6.740 mg

kg⁻¹ em 1.600 µmol L⁻¹ Zn, representando um aumento de vinte vezes (Soares *et al.*, 2001).

Na matéria seca de folha, o teor de Zn atingiu o máximo de 1.136 mg kg⁻¹, na dose 344 µmol L⁻¹ Zn, correspondendo a 7,3 vezes o teor no tratamento controle. Esse teor foliar de Zn é muito superior à faixa de 100 a 400 mg kg⁻¹, considerada tóxica para o crescimento de várias espécies vegetais (Kabata-Pendias e Pendias, 1984).

Conteúdo de nutrientes

De posse dos dados de teores de macro (Tabela 2) e de micronutrientes (Tabela 4) e da produção de matéria seca das diferentes partes das plantas (Tabela 5), foram então calculados os conteúdos. O conteúdo de macronutrientes foi influenciado pelas doses de Zn em solução nutritiva (Tabela 6), sendo que, de modo geral, houve decréscimo no conteúdo de todos eles, com o aumento das doses de Zn.

TABELA 5: Produção média de matéria seca de raiz, caule, folha, parte aérea e total de mudas de cedro (g muda⁻¹), em resposta a doses crescentes de zinco.

TABLE 5: Root, stem, leave, shoot and total dry matter production of cedro seedlings (g seedling⁻¹), in response to increasing levels of zinc.

Doses (µmol L ⁻¹)	Produção de Matéria Seca				
	Raiz	Caule	Folha	Parte Aérea	Total
2	2,40	4,20	8,42	12,62	15,02
76	1,63	3,18	5,72	8,90	10,53
152	1,36	2,97	5,25	8,22	9,58
304	0,82	1,67	3,59	5,26	6,08
456	0,67	1,32	3,03	4,34	5,01

Ao analisar o conteúdo de P e de K em todas as partes das plantas, verifica-se que houve redução linear com a aplicação de doses crescentes de Zn, exceção para o conteúdo de K nas folhas que apresentou resposta quadrática positiva, ocorrendo um ponto de mínimo na dose 367 µmol L⁻¹ Zn. Redução no conteúdo de P, com a aplicação de doses crescentes de Zn foi observada em *Eucalyptus urophylla*, em *Eucalyptus maculata* (Soares *et al.*, 2001) e em várias outras espécies de plantas (Boawn e Rasmussen, 1971), sugerindo haver antagonismo entre a absorção de P e a presença excessiva de Zn, conforme preconizado por Kabata-Pendias e Pendias (1984).

Os conteúdos de Ca, Mg e S reduziram de forma semelhante em todas as partes das plantas, apresentando resposta quadrática positiva, ou seja há uma redução no conteúdo de Ca, de Mg e de S ao aplicar menores doses de Zn, sendo que esse conteúdo aumenta com a aplicação de doses maiores. A estimativa do ponto de mínimo conteúdo indica que este ocorre em doses superiores a 340 µmol L⁻¹ Zn. De modo geral, metais pesados, como o zinco, reduzem o conteúdo de Ca e de Mg em diferentes espécies de plantas (Vásquez *et al.*, 1989; Huang e Cunningham, 1996; Soares *et al.*, 2001), mostrando haver antagonismo entre esses elementos (Kabata-Pendias e Pendias, 1984; Vásquez *et al.*, 1989).

O efeito do fornecimento de doses crescentes de Zn sobre o conteúdo de micronutrientes em diferentes partes das plantas de cedro foi significativo (Tabela 7), sendo que houve redução no conteúdo de Fe, Cu e Mn, ao passo que ocorreu aumento no conteúdo de Zn.

O Fe e o Mn, nas diferentes partes da mudas de cedro, tiveram seus conteúdos reduzidos com a aplicação de menores doses de Zn, passando a apresentar aumento nesse conteúdo partindo de doses mais elevadas. No caso do Fe, ocorreu um conteúdo mínimo na raiz, caule, folha, parte aérea e total, nas doses de 318 µmol L⁻¹, 333 µmol L⁻¹, 308 µmol L⁻¹, 313 µmol L⁻¹ e 309 µmol L⁻¹ Zn respectivamente. Enquanto para o manganês, esses valores foram de 212 µmol L⁻¹, 385 µmol L⁻¹, 414 µmol L⁻¹, 404 µmol L⁻¹ e 328 µmol L⁻¹ Zn respectivamente. Em outras espécies, foi observado o mesmo comportamento, ou seja, redução no conteúdo de Fe e de Mn com o aumento das doses de Zn, como ocorreu com mudas de eucalipto (Soares *et al.*, 2001) e com cevada (Brune *et al.*, 1994). Esse fato pode ser explicado pelo antagonismo que ocorre entre esses metais, em termos de absorção pelas plantas (Kabata-Pendias e Pendias, 1984).

TABELA 6: Equações de regressão de conteúdo de macronutrientes (Y), em diferentes partes das mudas de cedro, em resposta a diferentes doses de zinco (X).

TABLE 6: Regression equations of macronutrients accumulation (Y) in different parts of the cedro seedlings, in response to levels of zinc (X).

Nutrientes	Parte da Planta	Equação de Regressão	R ²
P	Raiz	$Y = 3,1 - 0,0036 X$	0,82
	Caule	$Y = 3,1 - 0,0026 X$	0,95
	Folha	$Y = 9,8 - 0,0113 X$	0,90
	Parte aérea	$Y = 12,9 - 0,0138 X$	0,88
	Total	$Y = 15,9 - 0,0175 X$	0,87
K	Raiz	$Y = 44,1 - 0,0819 X$	0,96
	Caule	$Y = 75,3 - 0,0994 X$	0,92
	Folha	$Y = 230,1 - 0,8354 X + 0,001137 X^2$	0,93
	Parte aérea	$Y = 276,6 - 0,4101 X$	0,84
	Total	$Y = 320,8 - 0,4920 X$	0,86
S	Raiz	$Y = 5,2 - 0,0207 X + 0,000028 X^2$	0,93
	Caule	$Y = 3,8 - 0,0145 X + 0,000021 X^2$	0,83
	Folha	$Y = 11,9 - 0,0394 X + 0,000053 X^2$	0,95
	Parte aérea	$Y = 15,7 - 0,0540 X + 0,000074 X^2$	0,93
	Total	$Y = 20,9 - 0,0747 X + 0,000102 X^2$	0,93
Ca	Raiz	$Y = 19,4 - 0,0791 X + 0,000101 X^2$	0,89
	Caule	$Y = 40,4 - 0,1788 X + 0,000256 X^2$	0,98
	Folha	$Y = 91,6 - 0,3095 x + 0,000378 X^2$	0,98
	Parte aérea	$Y = 132,0 - 0,4884 X + 0,000635 X^2$	0,97
	Total	$Y = 151,4 - 0,5675 X + 0,000736 X^2$	0,96
Mg	Raiz	$Y = 10,4 - 0,0568 X + 0,000083 X^2$	0,94
	Caule	$Y = 10,4 - 0,0387 X + 0,000051 X^2$	0,97
	Folha	$Y = 22,3 - 0,0629 X + 0,000073 X^2$	0,94
	Parte aérea	$Y = 32,7 - 0,1017 X + 0,000125 X^2$	0,95
	-	Total	$Y = 43,1 - 0,1585 X + 0,000208 X^2$

Em que: Todos os coeficientes das equações de regressão são significativos a 1% de probabilidade, pelo teste F.

Os conteúdos de Cu, na raiz e na planta como um todo, reduziram-se de forma linear com a aplicação de doses crescentes de Zn, ao passo que o conteúdo caulinar apresentou resposta quadrática positiva, com um ponto de mínimo na dose 388 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Zn. O conteúdo foliar apresentou resposta tipo raiz-quadrática negativa e o conteúdo de Cu na parte aérea foi crescente com as doses de Zn, mostrando que cada parte da planta responde de uma determinada forma. Essa redução no conteúdo radicular de Cu e o aumento no conteúdo na parte aérea podem ser explicado pela elevação da sua translocação, à medida que aumentam-se as doses de Zn, na solução nutritiva, conforme será visto adiante.

Quanto ao Zn, verifica-se que o seu conteúdo apresentou resposta tipo raiz-quadrática negativa na matéria seca de folha, parte aérea e total e resposta quadrática negativa para matéria seca de raiz e de caule com a aplicação de doses crescentes desse metal em solução nutritiva. Nas mudas de cedro, o conteúdo de Zn alcançou o máximo de 6.206 μg , 1.484 μg , 4.462 μg , 5.579 μg e 11.411 μg , na raiz, caule, folha, parte aérea e total respectivamente, representando um aumento de 3,5; 15,9; 15,0; 14,2 e 10,5 vezes em relação ao tratamento controle respectivamente. Esse aumento no conteúdo de zinco pode ser o responsável pela toxicidade desse metal, pois ele não é confinado às raízes, o que seria um mecanismo de tolerância (Colpaert e Van Assche, 1992). Ao contrário, as mudas de cedro chegam a apresentar um conteúdo foliar de Zn 15 vezes maior que as mudas do tratamento controle.

TABELA 7: Equações de regressão de conteúdo de micronutrientes (Y), em diferentes partes das mudas de cedro, em resposta a diferentes doses de zinco (X).

TABLE 7: Regression equations of micronutrients accumulation (Y) in different parts of cedro seedlings, in response to levels of zinc (X).

Nutrientes	Parte da Planta	Equação de Regressão	R ²
Fe	Raiz	$Y = 11171 - 67,75 X + 0,1065 X^2$	0,80
	Caule	$Y = 216 - 1,0230 X + 0,001537 X^2$	0,84
	Folha	$Y = 916 - 3,6700 X + 0,005960 X^2$	0,85
	Parte aérea	$Y = 1132 - 4,7000 X + 0,007497 X^2$	0,84
	Total	$Y = 12304 - 70,4500 X + 0,114000 X^2$	0,81
Cu	Raiz	$Y = 68,1 - 0,0901 X$	0,91
	Caule	$Y = 7,6 - 0,0233 X + 0,000030 X^2$	0,92
	Folha	$Y = 5,6 + 1,3697 X^{0,5} - 0,0513800 X$	0,75
	Parte aérea	$Y = 12,7 + 0,0208 X$	0,99
	Total	$Y = 85,3 - 0,0921 X$	0,78
Mn	Raiz	$Y = 1408 - 6,3100 X + 0,014900 X^2$	0,85
	Caule	$Y = 239 - 0,8985 X + 0,001162 X^2$	0,92
	Folha	$Y = 463 - 1,5392 X + 0,001858 X^2$	0,99
	Parte aérea	$Y = 703 - 2,4377 X + 0,003020 X^2$	0,97
	Total	$Y = 2111 - 11,7500 X + 0,017900 X^2$	0,89
Zn	Raiz	$Y = 1749 + 37,6700 X - 0,0796 X^2$	0,70
	Caule	$Y = 92,9 + 8,3576 X - 0,01255 X^2$	0,72
	Folha	$Y = 297 + 609,1300 X^{0,5} - 22,2711 X$	0,86
	Parte aérea	$Y = 392 + 699,4100 X^{0,5} - 23,5767 X$	0,83
	Total	$Y = 1087 + 1579,1600 X^{0,5} - 60,3844 X$	0,92

Em que: Todos os coeficientes das equações de regressão são significativos a 1% de probabilidade, pelo teste F.

Índice de translocação (IT)

A translocação de macro e de micronutrientes foi afetada significativamente pelas doses de zinco aplicadas em solução nutritiva (Tabela 8 e 9).

TABELA 8: Equações de regressão de índice de translocação de nutrientes (Y) em mudas de cedro, em resposta a diferentes doses de zinco (X).

TABLE 8: Equation regression of translocation index of nutrients (Y) in cedro seedlings, in response to different levels of zinc (X).

Nutrientes	Equação de Regressão	R ²
P	Y = n.s.	-
K	$Y = 85,4 + 0,0130 X$	0,79
S	$Y = 75,4 + 0,0124 X$	0,95
Ca	$Y = 86,6 + 0,0106 X$	0,97
Mg	$Y = 78,6 + 0,0291 X$	0,83
Fe	$Y = 10,2 + 0,0418 X - 0,000063 X^2$	0,90
Cu	$Y = 19,6 + 0,0359 X$	0,92
Mn	$Y = 35,5 + 0,1924 X - 0,000328 X^2$	0,92
Zn	$Y = 41,3 + 0,0475 X$	0,84

Em que: Todos os coeficientes das equações de regressão são significativos a 1% de probabilidade, pelo teste F; n.s. = não-significativo.

A translocação de macronutrientes apresentou um aumento linear com a aplicação das doses de Zn, exceto o IT de P, que não foi afetado significativamente. De acordo com Yang *et al.* (1996a, b), a translocação de S, em face da aplicação de metais pesados, pode ser estimulada ou inibida, dependendo da espécie. Segundo Alloway (1990), concentrações excessivas de metais essenciais e não-essenciais resultam em fitotoxicidade, sendo que um dos possíveis mecanismos responsáveis por tal disfunção é a substituição

de íons essenciais, especialmente macronutrientes. Esse aumento no IT dos macronutrientes pode ter sido motivado por tal fato, pois o metal, uma vez substituindo um determinado nutriente, faz com que a planta aumente a translocação desse nutriente.

TABELA 9: Índice médio de translocação de nutrientes (%) em mudas de cedro, em resposta a diferentes doses de zinco.

TABELA 9: Translocation index of nutrients (%) in cedro seedlings, in response to different levels of zinc.

Doses ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Índice de Translocação (%)								
	P	K	S	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
2	80,43	86,09	75,06	86,41	75,65	17,18	9,49	32,73	40,87
76	81,78	84,63	77,03	89,66	77,03	24,77	15,91	53,32	43,67
152	79,90	87,62	76,77	87,30	76,77	26,17	13,90	56,20	53,44
304	81,43	88,95	79,51	88,81	79,51	29,33	15,77	61,54	50,54
456	82,39	91,94	80,92	91,45	80,92	35,97	16,55	55,88	65,08

A presença de Zn aumentou o IT de Fe nas mudas de cedro até a dose $331,7 \mu\text{mol L}^{-1}$ Zn, reduzindo-o a partir daí. Agarwala *et al.* (1977) e Soares *et al.* (2001) observaram que o excesso de Zn reduziu a translocação de Fe para a parte aérea, induzindo clorose nas folhas. A resposta das mudas de cedro, aumentando o IT de Fe com o aumento da concentração de Zn, parece indicar que a presença de Zn inibe o metabolismo do Fe, a exemplo do que acontece com o Ni, daí o aparecimento de sintoma de deficiência induzida de Fe (Paiva *et al.*, 2000). O Zn induziu a translocação de Cu para a parte aérea, sendo que essa resposta foi linear. Quanto ao Mn, verificou-se um aumento na translocação deste até a dose $293,3 \mu\text{mol L}^{-1}$ Zn, diminuindo a partir de então.

O IT de Zn foi crescente com as doses desse metal em solução nutritiva, mostrando que, na presença de concentrações mais elevadas, esse elemento se transloca para a parte aérea em maiores proporções que a translocação apresentada pelas plantas no tratamento-controle. Nesse caso, verificou-se que, nas plantas-controle, houve uma translocação de 41,3% do Zn para a parte aérea, sendo que, ao aplicar a maior dose testada ($456 \mu\text{mol L}^{-1}$), essa translocação foi elevada a 63%, correspondendo ao aumento de 52,4%. Normalmente, as raízes contém muito mais Zn que a parte aérea, sobretudo se as plantas estiverem crescendo em ambientes ricos em Zn (Mengel e Kirkby, 1982; Kabata-Pendias e Pendias, 1984), sendo que, no presente caso, isso não ocorreu. Esse aumento na translocação de Zn da raiz para a parte aérea pode ter sido o responsável pela toxicidade desse metal para as mudas de cedro, conforme observado por Paiva *et al.* (2000).

CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos, pode-se concluir que:

A aplicação de doses crescentes de Zn, em solução nutritiva, aumenta o teor de P, K e Cu, reduz o teor de Ca, Mg, Fe, Mn e o conteúdo de macro e de micronutrientes nas diferentes partes das plantas analisadas;

O teor e o conteúdo de Zn cresce com a sua concentração em solução nutritiva;

O índice de translocação de macro e de micronutrientes, da raiz para a parte aérea, aumenta com a concentração de Zn no meio de crescimento, com exceção do fósforo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABICHEQUER, A.D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 1, p. 21-26, jan./mar. 1998.
- AGARWALA, S.C.; BISCHT, S.S.; SHARMA, C.P. Relative effectiveness of certain heavy metals in producing toxicity and symptoms of deficiency in barley. **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 55, n. 10, p. 1299-1307, May 1977.
- ALLOWAY, B.J. Cadmium. In: ALLOWAY, B.J. (Ed.). **Heavy metal in soils**. New York: J. Willey, 1990. p.100-121.
- BOAWN, L.C.; RASMUSSEN, P.E. Crop response to excessive zinc fertilization of alkaline soil. **Agronomy Journal**,

Madison, v. 63, n. 6, p. 874-876, Nov./Dec. 1971.

BRUNE, A.; URBACH, W.; DIETZ, K.J. Compartmentation and transport of zinc in barley primary leaves as basic mechanisms involved in zinc tolerance. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 17, n. 2, p. 153-162, Feb. 1994.

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.

COLPAERT, J.V.; VAN ASSCHE, J.A. Zinc toxicity in ectomycorrhizal *Pinus silvestris*. **Plant and Soil**, London, v. 143, p. 201-211, June 1992.

HUANG, J.W.; CUNNINGHAM, S.D. Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. **The New Phytologist**, New York, v. 134, n. 1, p. 75-84, Sept. 1996.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 1984. 315p.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa/SP: Ed. Plantarum, 1992. 352p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

MARQUES, T.C.L.L.S.M. **Crescimento e absorção mineral de mudas de espécies arbóreas em material de solo contaminado com metais pesados**. 1996. 116p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1996.

MARQUES, T.C.L.L.S.M.; MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. Crescimento e teor de metais de mudas de espécies arbóreas cultivadas 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**. 2. ed. London: Academic Press, 1995. 889p.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 3. ed. Worblanfen-Bern: International Potash Institute, 1982. 655p.

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, out./dez. 2000.

SOARES, C.R.F.S.; GRAZZIOTTI, P.H.; SIQUEIRA, J.O.; CARVALHO, J.G.; MOREIRA, F.M.S. Toxidez de zinco no crescimento e nutrição de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 2, p. 339-348, fev. 2001.

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.

YANG, X.; BALIGAR, V.C.; MARTENS, D.C.; CLARK, R.B. Plant tolerance to nickel toxicity: II. Nickel effects on influx and transport of mineral nutrients in four plant species. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 19, n. 2, p. 265-279, Feb. 1996a.

YANG, X.; BALIGAR, V.C.; MARTENS, D.C.; CLARK, R.B. 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. 1996b.