

**TOXIDEZ DE ZINCO, COBRE, CÁDMIO E
CHUMBO PARA O EUCALIPTO EM
SOLUÇÃO NUTRITIVA**

CLÁUDIO ROBERTO FONSÊCA SOUSA SOARES

1999

47233

33165 MFN

CLÁUDIO ROBERTO FONSÊCA SOUSA SOARES

**TOXIDEZ DE ZINCO, COBRE, CÁDMIO E CHUMBO PARA O
EUCALIPTO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Mestre".

Orientador:

Prof. José Oswaldo Siqueira

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

1999

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Soares, Cláudio Roberto Fonsêca Sousa

Toxidez de zinco, cobre, cádmio e chumbo para o eucalipto em solução nutritiva
/ Cláudio Roberto Fonsêca Sousa Soares. – Lavras : UFLA, 1999.

132 p. : il.

Orientador: José Oswaldo Siqueira.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Metal pesado – Tolerância. 2. Eucalipto. 3. Toxidez. 4. Fitorremediação. 5.
Nutrição mineral – Absorção. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-634.97342

*Aos meus familiares, em especial a minha
mãe Hilda, pela educação, apoio e carinho.*

Dedico

*“Mestre não é quem sempre ensina,
mas quem de repente aprende”*

(Guimarães Rosa)

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1. Sintomas de Toxidez.....	3
2.2. Fisiologia da Toxidez por Metais Pesados.....	4
2.3. Absorção e Translocação de Metais Pesados.....	5
2.4. Níveis Críticos de Metais Pesados.....	7
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	10
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
4.1. Sintomas de Fitotoxidez.....	15
4.2. Efeitos no Crescimento e Doses Críticas de Toxidez.....	23
4.3. Metais Pesados na Parte Aérea e Raízes: Concentração e Acúmulo.....	32
4.4. Fator de Transferência e Potencial de Acumulação de Metais Pesados.....	61
4.5. P, K, S, Ca e Mg na Parte Aérea e Raízes: Concentração e Acúmulo.....	64
5. CONCLUSÕES.....	94
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96
ANEXOS.....	103

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e à Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela oportunidade de realização do curso e concessão da bolsa de estudos.

À Companhia Mineira de Metais (CMM) – Três Marias, MG e a Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão (FAEPE), pelo apoio financeiro para a realização desse estudo.

Ao Professor Dr. José Oswaldo Siqueira, pela orientação segura, conselhos e ensinamentos atualizados.

Às Professoras Janice Guedes de Carvalho e Fátima Maria S. Moreira, pelas críticas e sugestões construtivas à dissertação.

Aos Funcionários e Professores do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, em especial aos Professores Valdemar Faquin e Janice Guedes de Carvalho, pela liberação do espaço e empréstimo do material necessários à montagem dos ensaios.

Ao colega e amigo Paulo Henrique Graziotti, pela liberação de dados experimentais e condução dos ensaios.

Aos colegas e amigos Adriana Accioly, Mateus Rosas R. Filho, Marcelo Villa, Júlio Bertoni, Ana Rosa Bastos, Eliane Pereira, entre tantos, pelo convívio, sugestões e palavras amigas.

À Luciana Canton, pelo carinho e atenção.

À amiga Ana Veruska Cruz, pela duradoura e sincera amizade.

Aos colegas de República Cláudio Manoel Rodrigues de Melo, Osni Vieira Prado e Wagner Luiz Pontes, pelo companheirismo e agradável convívio.

RESUMO

SOARES, Cláudio Roberto Fonsêca Sousa. Toxidez de Zinco, Cobre, Cádmiio e Chumbo para o Eucalipto em Solução Nutritiva. Lavras: UFLA, 1999. 132p. (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)^{*}

Ensaio independentes em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras foram desenvolvidos no período de junho/96 a dezembro/97 para avaliar a toxidez de Zn, Cu, Cd e Pb em *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla*. Mudanças foram produzidas em areia+vermiculita e transplantadas para vasos contendo 2L de solução nutritiva de Clark, adicionando-se separadamente doses crescentes dos metais a serem estudados: 0, 400, 800, 1200 e 1600 μM para o Zn; 0, 32, 64, 128 e 192 μM para o Cu; 0, 45, 90, 135 e 180 μM para o Cd e 0, 97, 194, 291 e 388 μM para o Pb. Todas as soluções tiveram o pH ajustado para 5,5 e foram renovadas semanalmente. Após cinco semanas de exposição aos metais, as espécies exibiram sintomas acentuados de fitotoxidez, manifestados principalmente por murchamento, clorose e necrose dos tecidos, morte das gemas apicais e inibição do crescimento. As doses críticas na solução (para redução de 10% na matéria seca da parte aérea) foram, em μM : Zn=170,3; Cu=3,3; Cd=2,4 e Pb=18,9 para *E. maculata* e Zn=73,0; Cu=8,3; Cd=1,5 e Pb=35,5 para *E. urophylla*. Isto indica que o grau de toxidez desses elementos variou para as espécies e metais estudados. A fitotoxidez foi decrescente na seguinte ordem: Cd>Cu>Pb>Zn. Os níveis críticos de toxidez na planta foram, em mg kg^{-1} da matéria seca da parte aérea: Zn=853; Cu=12,2; Cd=14,5 e Pb=84,2 para *E. maculata* e Zn=697,8; Cu=13,0; Cd=10,8 e Pb=104,8 para *E. urophylla*. Com base nesses resultados, verifica-se que *E. maculata* é mais tolerante a Zn e Cd, enquanto *E. urophylla* o é a Cu e Pb. A absorção, acúmulo e translocação são diferentes para cada elemento e foram influenciados pelas doses empregadas. Cd e Zn são translocados em grande quantidade das raízes para a parte aérea das plantas, enquanto Cu e Pb são pouco translocados, acumulando-se nas raízes. A absorção e translocação de Fe foram reduzidas pelos metais pesados, evidenciando a deficiência induzida de Fe nas plantas. O potencial de acumulação e o fator de transferência dos metais pesados também mostraram comportamentos distintos para espécie e metal. Os resultados evidenciam as dificuldades para interpretação dos efeitos dos metais pesados sobre as espécies em solos multi-contaminados.

^{*} Comitê Orientador: José Oswaldo Siqueira – UFLA (Orientador), Janice Guedes de Carvalho – UFLA

ABSTRACT

SOARES, Cláudio Roberto Fonsêca Sousa. Toxicity of Zinc, Copper, Cadmium and Lead for *Eucalyptus* in Nutrient Solution. Lavras: UFLA, 1999. 132 p. (Dissertation – Master of Science in Soil and Plant Nutrition)*

Independent trials in greenhouse at the Department of Soil Science of the Federal University of Lavras were developed from June/96 to December/97 to evaluate the toxicity of Zn, Cu, Cd and Pb in *Eucalyptus maculata* and *Eucalyptus urophylla*. Seedlings were produced in a sand/vermiculite mix and transplanted to pots containing 2L of Clark's nutrient solution containing increasing levels of different heavy metals ranging from: 0, 400, 800, 1200 and 1600 μM for Zn; 0, 32, 64, 128 and 192 μM for Cu; 0, 45, 90, 135 and 180 μM for Cd and 0, 97, 194, 291 and 388 μM for Pb. Solutions were renewed weekly and had pH adjusted to 5.5. After five weeks of growth, plants in most metal treatments exhibited phytotoxicity symptoms mainly manifested by wilting, chlorosis and necrosis of tissues, death of apical buds and growth inhibition. The critical metal doses in the solution, for 10% reduction of shoot dry matter, were in μM : Zn=170,3; Cu=3,3; Cd=2,4 and Pb=18,9 for *E. maculata* and Zn=73,0; Cu=8,3; Cd=1,5 e Pb=35,5 for *E. urophylla*. This shows that toxicity of these metals varied for the species and metal. Phytotoxicity was decreasing in the following order: Cd>Cu>Pb>Zn. The plant critical toxicity levels were in mg kg^{-1} of shoot dry matter: Zn=853; Cu=12,2; Cd=14,5 and Pb=84,2 for *E. maculata* and Zn=697,8; Cu=13,0; Cd=10,8 e Pb=104,8 for *E. urophylla*. These results indicate that *E. maculata* is more tolerant to Zn and Cd while *E. urophylla* is to Cu and Pb. Absorption, accumulation and translocation patterns are different for different metals and were influenced by the doses. Cd and Zn are translocated in great amount from roots to shoot, whereas Cu and Pb showed less translocation, therefore accumulating in the roots. Absorption and translocation of Fe were reduced by all these metals, causing induced Fe-deficiency. The accumulation potential and transference factor also showed distinct behaviors for species and metals. These results indicate difficulties assessing the effects of heavy metals on different plant species growing in multicontaminated soils.

*Guidance Committee: José Oswaldo Siqueira – UFLA (Major Professor), Janice Guedes de Carvalho – UFLA

1. INTRODUÇÃO

Ajustar texto?

O aumento de atividades industriais e de mineração e a crescente necessidade de aplicação de biosólidos e fertilizantes no solo têm alterado o ciclo geoquímico e fluxo natural dos metais pesados, aumentando a liberação destes elementos na biosfera. Isto tem despertado, nas últimas décadas, enorme interesse a respeito do impacto ambiental que estes metais causam em suas interações com os organismos vivos.

De fato, ecossistemas de áreas próximas a complexos urbanos, indústrias metalúrgicas, mineração e rodovias, contêm concentrações elevadas de metais pesados em relação aos mesmos ecossistemas sem estas influências antrópicas. A contaminação do solo, cursos de água e lençol freático são problemas ambientais graves que necessitam de efetiva solução tecnológica. Dentre as inúmeras estratégias de remediação, a fitorremediação é uma alternativa promissora, destacando-se a implantação de maciços florestais nestas áreas. O uso de espécies arbóreas nesta situação é muito interessante, uma vez que os metais pesados, ao serem absorvidos pelas plantas, ficarão mais tempo imobilizados nos tecidos vegetais, reduzindo o tempo de ciclagem desses elementos no solo, minimizando o potencial de risco causado por estes e facilitando a remediação do solo. O sucesso de programas de fitorremediação de áreas contaminadas por metais pesados envolve estudos básicos a respeito da fitotoxicidade desses elementos e da tolerância das espécies aos estresses impostos pelo excesso de metais. Neste contexto, conhecer os padrões de absorção, translocação e acúmulo de íons metálicos, os limites de tolerância e os sintomas de fitotoxidez das espécies com potencial para introdução nestas áreas é de grande importância acadêmica e

autor

tecnológica. Isto tem sido bastante estudado para espécies arbóreas temperadas, em que se relacionam respostas ao excesso de metais com o grau de tolerância das espécies. No entanto, são raríssimos os trabalhos que tratam do efeito isolado dos diferentes metais pesados no crescimento e nutrição mineral de espécies arbóreas tropicais como eucalipto. As características de rápido crescimento, sistema radicular bastante desenvolvido e facilidade de aclimação tomam o eucalipto uma espécie com potencial para emprego em programas de recuperação de áreas degradadas pela deposição de metais pesados no solo.

Objetiva-se, com este trabalho, avaliar a toxidez de Zn, Cu, Cd e Pb no crescimento e nutrição mineral de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva contendo doses crescentes destes metais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2. 1. Sintomas de Toxidez

Estudos relacionados a metais pesados em plantas iniciaram-se por volta da década de 40 e 50 devido à necessidade de se entender os efeitos destes elementos no meio ambiente. Estes estudos enfatizavam, principalmente, as espécies que participam da cadeia alimentar do homem e/ou que possuem valor econômico. Smith e Specht (1952) verificaram que plantas de citrus crescidas com 10 mg L^{-1} de Cu (= $157 \text{ } \mu\text{M}$) apresentavam clorose acentuada, a qual era acompanhada de severa redução no crescimento de raiz. Mais tarde, Crooke (1958) observou que os metais pesados promoviam um distúrbio no metabolismo das plantas, sendo a ocorrência de clorose resultante da deficiência induzida de ferro. A clorose das folhas mais novas é um dos sintomas comuns da fitotoxicidade dos metais pesados, sendo esta frequentemente associada com baixa concentração de Fe devido à inibição da mobilização, absorção e/ou translocação deste elemento na planta (Fontes e Cox, 1998b; Schmidt et al., 1997; Smith e Specht, 1952).

Em geral, os sintomas mais visíveis da fitotoxicidade por metais pesados incluem, caracteristicamente, redução do crescimento, sobretudo do sistema radicular, clorose e necrose nas folhas e, posteriormente, sintomas típicos de senescência e abscisão (Breckle e Kahle, 1992a; Barceló e Poschenrieder, 1992; Punz e Sieghardt, 1993). Heale e Ormrod (1982) observaram que a toxicidade de Cu em *Acer rubrum*, *Cornus stolonifera*, *Lonicera tatarica* e *Pinus resinosa* promoveu o desenvolvimento de clorose foliar internerval, extremidade de folhas enegrecidas, folhas pequenas anormais e pigmentos foliares, os quais foram

influenciados pelo nível de Cu ao qual as espécies individuais foram expostas. Neste mesmo estudo, observou-se que se desenvolveram necroses nas raízes e as raízes laterais eram raquíticas, grossas e reduzidas em número. Outros sintomas de toxidez promovidos por metais pesados são o decréscimo na densidade de pêlos radiculares, especialmente para o Pb, ou seu colapso prematuro por Cu, Ni e Co como consequência de alteração no balanço hormonal (Punz e Sieghardt, 1993); coloração marrom das raízes, que pode ser devida ao aumento da suberização que limita a absorção de água e causa déficit hídrico na planta (Punz e Sieghardt, 1993; Marchiol et al., 1996). Alterações na orientação de folhas também são verificados em plantas de *Glycine max.* L. cultivadas em níveis normais de Zn, as folhas orientavam-se horizontalmente, enquanto em plantas crescidas sob toxidez de Zn, as folhas tiveram orientação vertical (Fontes, 1992). Comportamento semelhante é verificado para Cd (Fontes e Sousa, 1996). Nos sistemas florestais, os impactos típicos de metais pesados incluem a redução de produtividade, alteração na composição de espécies vegetais e microbianas e aumento de efeitos secundários tais como ataque de pragas e doenças (Burton e Morgan, 1984).

2. 2. Fisiologia da Fitotoxidez por Metais Pesados

Toxidez de metais pesados pode causar influências diretas e indiretas em praticamente todos os processos metabólicos das plantas. O mecanismo primário envolve alteração da função catalítica de enzimas, danos nas membranas celulares, inibindo o crescimento das raízes (Shen et al., 1998). As membranas e o núcleo são seguramente os locais primários de ação desses elementos, embora não se deva esquecer das interações sobre a estrutura e propriedades da parede

celular. No plasmalema, destaca-se a interação com as ATPases translocadoras de H^+ e a alteração no empacotamento dos fosfolípidos (Barceló e Poschenrieder, 1992). Outras alterações fisiológicas são a redução na atividade da enzima peroxidase (Oliveira et al., 1994b), redução no conteúdo de clorofila *a* e *b* (Kastori et al., 1998), redução da integridade das membranas que causa efluxo de íons, sobretudo de K^+ (Murphy e Taiz, 1997), diminuição da síntese do material de parede celular e/ou redução de sua extensibilidade e os efeitos sobre o citossol e orgânulos, principalmente cloroplastos, mitocôndrias e Complexo de Golgi (Barceló e Poschenrieder, 1992). A parede celular pode aumentar a sua rigidez, provavelmente devido a alterações enzimáticas na biossíntese de constituintes da parede, por alterações na formação dos polímeros da parede, por mudança de disposição dos microtúbulos ou devido ao aumento da adesão celular da lamela média (Barceló e Poschenrieder, 1992). A importância da membrana citoplasmática nos mecanismos de tolerância frente à toxicidade por metais pesados tem sido reconhecida recentemente para Cu. Estudos com plantas de *Silene cucubalus* e de *Mimulus guttatus* tolerantes a Cu indicam que o mecanismo primário, tanto da toxicidade do Cu como da tolerância a esse metal, reside na plasmalema (Murphy e Taiz, 1997). Segundo Punz e Sieghardt (1993), a resistência de plantas superiores a metais pesados não é um simples atributo fisiológico, mas um conjunto de adaptações celulares e bioquímicas.

2. 3. Absorção e Translocação de Metais Pesados

Espécies ou variedades de uma mesma espécie de planta, expostas a uma concentração similar de metal, podem diferir na absorção e/ou distribuição interna do elemento na planta. Essa distribuição diferencial pode ser resultado de

O nível crítico de um elemento no substrato de crescimento, independente de sua essencialidade, é a concentração abaixo ou acima do desejável no

diferenças na capacidade de retenção do elemento absorvido nas raízes e/ou variação na carga no xilema ou retranslocação do metal no floema (Barceló e Poschenrieder, 1992). Outros fatores, tais como estágio de crescimento da planta,

substrato que promove redução na produção de parte aérea, o qual varia conforme a espécie vegetal e condição ambiental. De acordo com Davis et al. (1978), os níveis críticos de toxidez em solução nutritiva para *Hordeum vulgare* L. são, em mg L^{-1} : $\text{Cd}^{2+} = 0,5$ ($= 4,4\mu\text{M Cd}$); $\text{Cu}^{2+} = 4$ ($= 63\mu\text{M Cu}$); $\text{Ni}^{2+} = 1,5$ ($= 26\mu\text{M Ni}$); $\text{Hg}^{2+} = 4$ ($= 20\mu\text{M Hg}$); $\text{Pb}^{2+} = 25$ ($= 120\mu\text{M Pb}$) e $\text{Zn}^{2+} = 9$ ($= 140\mu\text{M Zn}$). Kabata-Pendias e Pendias (1985) apresentam, sem considerar a espécie vegetal, uma faixa de concentração total de metais pesados, na superfície do solo, considerados fitotóxicos, em mg kg^{-1} : Cd = 3-8; Cu = 60-125; Pb = 100-400 e Zn = 70-400. Cobre é frequentemente descrito como altamente tóxico em solução nutritiva (Kabata-Pendias e Pendias, 1985). No entanto, quando adicionado ao solo, o Cu liga-se fortemente a muitos componentes do solo, o que consideravelmente reduz sua disponibilidade para as raízes (Arduini et al., 1996). Através dos níveis críticos de toxidez em solução nutritiva para inibir o comprimento de raiz de espécies arbóreas, verifica-se que a toxicidade relativa decresce na ordem Cd>Cu>Pb>Zn (Kahle, 1993).

O nível crítico de toxidez na planta é a concentração de metal no tecido foliar acima do qual a produção de parte aérea é reduzida (Burton e Morgan, 1984; Mengel e Kirkby, 1987). Okhi, citado por Dechen, Bataglia e Santos (1995), definiu o nível crítico de toxidez na planta como sendo a concentração do elemento que reduz em 10% a produção da planta. De acordo com Davis et al. (1978), a concentração crítica de alguns metais pesados no tecido foliar da espécie *Hordeum vulgare* L é, em mg kg^{-1} : Cd = 15; Cu = 20; Hg = 3; Ni = 26; Pb = 35 e Zn = 290. Kabata-Pendias e Pendias (1985) apresentam uma faixa de concentração de metais pesados no tecido foliar, considerados potencialmente fitotóxicos, sem a especificação de espécies, em mg kg^{-1} : Cd = 5-30; Cu = 20-100; Pb = 30-300 e Zn = 100-400. Assim, a concentração foliar de metais pesados representa um parâmetro adequado para avaliação da toxicidade desses

elementos (Breckle e Kahle, 1992b) desde que relacionada com a produção de matéria seca ou crescimento.

Os níveis críticos de toxidez em solução nutritiva e no tecido vegetal têm sido empregados em alguns estudos com espécies herbáceas acumuladoras de metais (Shaw, 1989; Pollard e Baker, 1997), espécies arbóreas de clima temperado (Baker, 1981) e mudas arbóreas nativas dos trópicos (Marques, 1996). No entanto, para o eucalipto, são encontrados na literatura apenas trabalhos relacionados à deficiência nutricional de micronutrientes (Dell e Robinson, 1993; Dell, Malajczuk e Grove, 1995), havendo carência de estudos que tratam do efeito isolado da toxidez por metais pesados e determinações de níveis críticos de toxidez desses elementos. O emprego de espécies de eucalipto em áreas contaminadas com metais é uma das alternativas de grande potencial para a fitorremediação devido às suas características de rápido crescimento, sistema radicular bastante desenvolvido e facilidade de aclimação. Com isso, as espécies de eucalipto podem amenizar os danos ambientais que o excesso de metais pesados oferece, além de poder proporcionar algum retorno econômico e melhorias visuais da área (Shaw, 1989).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Ensaio independentes foram conduzidos com vários metais pesados em solução nutritiva em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras - UFLA no período de junho a agosto de 1996, para Zn, e de março a dezembro de 1997 para Cu, Cd e Pb. Utilizaram-se mudas de *Eucalyptus uraphylla* e *Eucalyptus maculata* selecionadas com base nos comportamentos destas espécies em outros estudos com solo multi-contaminado por metais pesados já desenvolvidos neste departamento.

As mudas de eucalipto foram produzidas em substrato contendo areia+vermiculita, irrigadas semanalmente com solução nutritiva de Clark (1975) (Tabela 1) com a concentração de todos os nutrientes reduzida à metade, utilizando-se reagentes PA na preparação da solução.

Duas semanas após emergência do primeiro par de folhas, as mudas foram transplantadas e mantidas durante 15 dias em bandejas coletivas com capacidade para 30L contendo a mesma solução nutritiva de Clark, com aeração constante e pH mantido em 5,5 pela adição de NaOH ou HCl 0,1N. Em seguida, a solução foi substituída por outra que continha a concentração normal dos nutrientes (solução básica de Clark), permanecendo nesta por mais 15 dias, quando atingiram altura média de 20 cm. Após padronização quanto à altura e vigor, transplantaram-se duas plantas por vaso de 2L contendo os tratamentos constantes de concentrações crescentes de metal, dispostos num esquema fatorial 2x5 (duas espécies de eucalipto e cinco doses do metal em estudo), em delineamento blocos casualizados, com quatro repetições, perfazendo, assim, um total de 40 parcelas para cada elemento estudado. As doses utilizadas dos metais (Tabela 2) foram definidas com base em ensaios preliminares, sendo as soluções

renovadas semanalmente e o pH mantido em 5,5 pela adição de NaOH ou HCl 0,1N. Na preparação de todas as soluções estoque dos metais estudados, empregaram-se reagentes PA, sendo o Zn, Cd e Cu fornecidos na forma de SO_4^{2-} e o Pb como PbCl_2 .

TABELA 1. Fontes, solução estoque e composição final da solução nutritiva de Clark (1975) utilizada para o crescimento de *E. maculata* e *E. urophylla*

<i>Fonte/Solução Estoque</i>	<i>mL L⁻¹</i>	<i>Concentração</i>
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1M	2,53	2,53 mM Ca 5,06 mM N - NO_3^-
NH_4NO_3 1M	0,90	0,90 mM N - NH_4^+ 0,90 mM N - NO_3^-
KNO_3 1M	1,30	1,30 mM N - NO_3^- 1,30 mM K
KCl 1M	0,50	0,50 mM K 0,50 mM Cl
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 23 mM	1,50	0,03 mM Ca 0,07 mM P
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1M	0,50	0,50 mM Mg 0,50 mM S
MgCl_2 0,1M	1,00	0,10 mM Mg 0,20 mM Cl
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 7 mM		7,00 μM Mn
H_3BO_3 19 mM		19,0 μM B
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2 mM	1,00	2,00 μM Zn
$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0,086 mM		0,60 μM Mo
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0,5 mM		0,50 μM Cu
FeCl_3 38 mM + EDTA	1,00	38,0 μM Fe

TABELA 2. Doses e fonte de metais pesados utilizados nos tratamentos

Metal	Doses		Fonte
	μM	$\text{mg de metal L}^{-1}$	
Zn	0, 400, 800, 1200 e 1600	0, 25, 50, 75 e 100	ZnSO ₄
Cu	0, 32, 64, 128 e 192	0, 2, 4, 8 e 12	CuSO ₄
Cd	0, 45, 90, 135 e 180	0, 5, 10, 15 e 20	CdSO ₄
Pb	0, 97, 194, 291 e 388	0, 20, 40, 60 e 80	PbCl ₂

As plantas foram mantidas por cinco semanas de exposição aos metais, quando verificou-se a ocorrência de sintomas de toxidez e procedeu-se a colheita das mesmas, separando-as em parte aérea e raiz. Nos experimentos para Cu, Cd e Pb, foram determinados a área foliar e comprimento de raízes através dos equipamentos Transparent Belt Conveyer mod. LI-3050A (LI-COR, inc. Lincoln-USA) e Comair Root Length Scanner mod. TM 001 (Hawker de Havilland Victoria Limited, Port Melbourne-Austrália), respectivamente. Após essas avaliações, as plantas foram secas em estufa com circulação de ar a 65°C até peso constante, pesadas e moídas em moinho tipo Wiley equipado com peneira com malha de 0,38 mm para digestão nítrico-perclórica, e foi feita a análise das concentrações dos metais Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, e Pb por espectrofotometria de absorção atômica e de nutrientes. O P foi determinado por colorimetria, através do método fosfo-molibdato adaptado por Braga e Defelipo (1974); o K, por fotometria de chama; o S, por colorimetria; o Ca e Mg, por espectrofotometria de absorção atômica (Malavolta, Vitti e Oliveira, 1989).

Além do peso de matéria seca da parte aérea (caule + folha) e raízes, foram calculadas a razão entre a matéria seca de raiz e da parte aérea (R/PA) e a razão comprimento de raiz e matéria seca da raiz (C/MSR). Para a produção da

matéria seca relativa da parte aérea e raízes, considerou-se 100% o valor obtido no tratamento controle sem nenhuma adição de metal na solução. As quantidades acumuladas de P, K, S, Ca, Mg, Zn, Cu, Cd, Pb, Mn e Fe na parte aérea e raízes foram calculados com base nas concentrações e produção de matéria seca. Através das quantidades acumuladas, calcularam-se os índices de translocação (IT) dos elementos, de acordo com Abicheuer e Bohnen (1998), como equação a seguir:

$$IT = \frac{\text{Quantidade acumulada na parte aérea} \times 100}{\text{Quantidade acumulada na planta}}$$

Avaliou-se também o fator de transferência de metais pesados da solução nutritiva para a parte aérea e raízes (FT), considerando-se redução de 25% da produção de matéria seca (Hämmann e Gupta, 1998) com base nas equações de regressão obtidas para cada espécie e elemento, como equação a seguir:

$$\text{Fator de transferência (FT)} = \frac{\text{Concentração no tecido (mg kg}^{-1}\text{)}}{\text{Concentração na solução (mg kg}^{-1}\text{)}}$$

Baseando-se nas concentrações máxima e na dose 0 μM , calculou-se o potencial de acúmulo dos metais pesados estudados na parte aérea e raízes (PAC_{PA} e PAC_{R} , respectivamente), como sendo:

$$\text{PAC}_{\text{PA}} = \frac{\text{Conc. máxima na parte aérea}}{\text{Conc. na dose } 0 \mu\text{M}}$$

$$\text{PAC}_{\text{R}} = \frac{\text{Conc. máxima nas raízes}}{\text{Conc. na dose } 0 \mu\text{M}}$$

Os resultados foram submetidos à análise de variância através do uso do programa estatístico SAEG (Euclides, 1983). As equações de regressão foram determinadas pelo programa TableCurve 2D for Windows v. 2.03 (Jandel Scientific, 1994) e Fcalc32 for Windows v. 1.1 (Moura Filho e Cruz, 1996). As doses críticas dos metais Zn, Cu, Cd e Pb em solução (consideradas como a concentração do elemento na solução nutritiva que reduz em 10% os parâmetros de crescimento) e os níveis críticos na planta (concentração foliar do metal requerida para inibir em 10% a matéria seca da parte aérea) foram estimados com base nas equações de regressão obtidas para cada espécie e elemento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4. 1. Sintomas de Fitotoxidez

Os metais Zn, Cu, Cd e Pb promoveram sintomas acentuados de toxidez nas duas espécies de eucalipto, sendo os principais apresentados nas Tabelas 3 e 4. Cd e Zn causaram orientação vertical das folhas e nervuras com coloração avermelhada acompanhadas de clorose e necrose (Tabela 3; Figura 1). O Pb promoveu morte das gemas apicais e elevada necrose nas pontas das folhas, que se prolongava para o centro no *E. urophylla*, enquanto no *E. maculata* ocorreu clorose internerval das folhas mais novas, não havendo necrose no tecido foliar (Figura 2). A clorose em folhas novas em plantas sob toxidez de Pb resulta da interferência desse elemento na síntese de clorofila e na diminuição do transporte de Fe para o simplasto foliar, causadas pelos íons Pb^{2+} (Fodor et al., 1998). Manchas aquosas que se tornavam necróticas foram os sintomas apresentados por *E. urophylla* sob estresse de Cu (Figura 2), enquanto na espécie *E. maculata* houve murchamento e clorose internerval nas folhas novas (Figura 3). Segundo Malavolta (1980), é possível que a presença de manchas aquosas seja provocada pelo deslocamento do Fe dos citocromos, ferredoxina e da enzima peroxidase efetuados pelo Cu. A ocorrência de clorose e necrose pode estar relacionada com a deficiência múltipla de vários elementos que participam da formação, multiplicação e funcionamento de cloroplastos, ou na síntese de clorofila (Breckle e Kahle, 1992b; Marques, 1996). A deficiência de nutrientes pode ser resultado da inibição competitiva que os metais podem promover na absorção de outros íons (Malavolta, 1994). Em doses mais elevadas, os metais estudados proporcionaram, em *E. urophylla*, elevada queda de folhas, deixando-a

TABELA 3. Principais sintomas de toxidez de Zn, Cu, Cd e Pb na parte aérea de mudas de *Eucalyptus maculata* (MAC) e *Eucalyptus urophylla* (URO) crescidas em solução nutritiva

Metal/Espécie	Sintomas de Toxidez
Zn – MAC	- Clorose internerval nas folhas mais novas nas doses de 800 μM - Morte das plantas nas doses de 1200 e 1600 μM , com folhas esverdeadas e aspecto coriáceo
Zn – URO	- Arroxamento pontual próximo às nervuras das folhas basais, com posterior clorose - Curvatura vertical das folhas mais velhas
Cu – MAC	- Murchamento em todas as folhas nas doses acima de 32 μM após 24 horas de aplicação dos tratamentos - Clorose internerval nas folhas mais novas em 32 e 64 μM
Cu – URO	- Redução da área foliar apenas nas doses acima de 32 μM - Manchas aquosas que se tornavam necróticas após 1 semana de exposição ao metal nas doses de 64 e 128 μM - Morte das gemas apicais em 192 μM
Cd – MAC	- Pontuações avermelhadas nas nervuras, com posterior clorose - Murchamento em todas as folhas nas doses acima de 90 μM , com posterior aspecto coriáceo
Cd – URO	- Pontuações avermelhadas nas folhas basais, seguidas de necrose - Curvatura vertical das folhas mais velhas - Morte das gemas apicais na dose de 180 μM
Pb – MAC	- Clorose internerval das folhas mais novas nas doses de 194 e 291 μM - Murchamento em todas as folhas na dose de 388 μM
Pb – URO	- Morte das gemas apicais e necrose nas bordas das folhas basais, que se prolongava para o centro em 291 e 388 μM

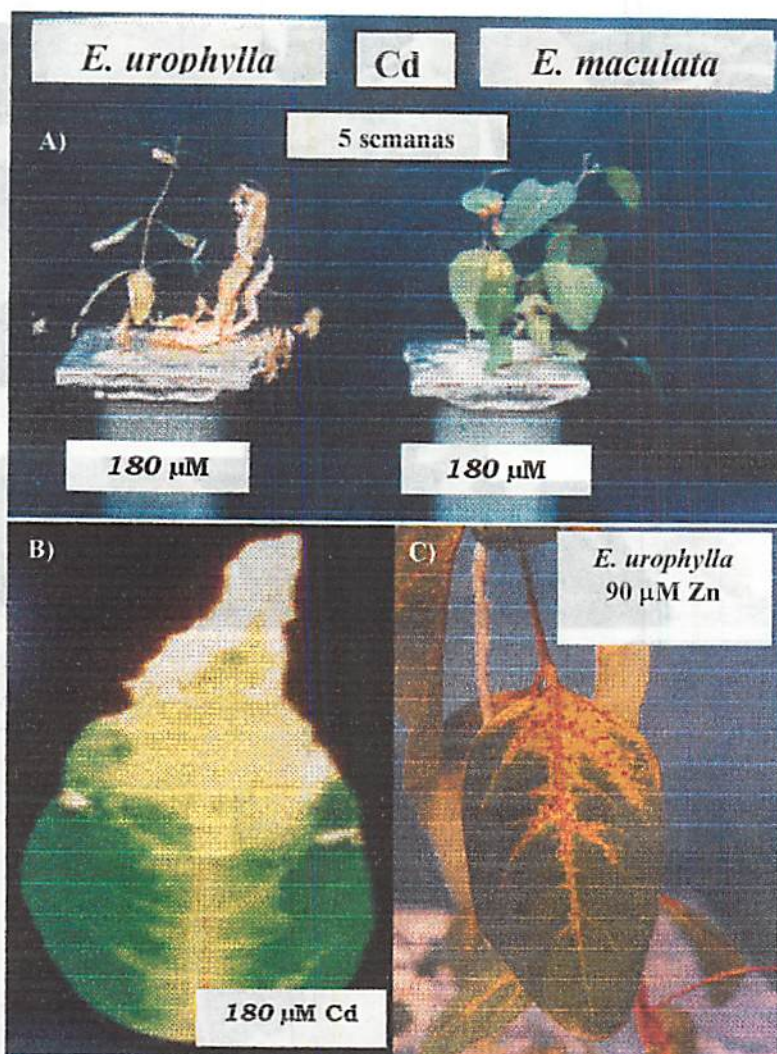


FIGURA 1. Sintomas de toxidez de Cd e Zn em mudas de eucalipto. A) morte das gemas apicais e desfolhamento em *E. urophylla*; crescimento reduzido de *E. maculata* B) detalhe do sintoma de toxidez de Cd em *E. maculata*, mostrando necrose foliar; C) arroxejamento pontual das nervuras das folhas basais de *E. urophylla*, com posterior clorose

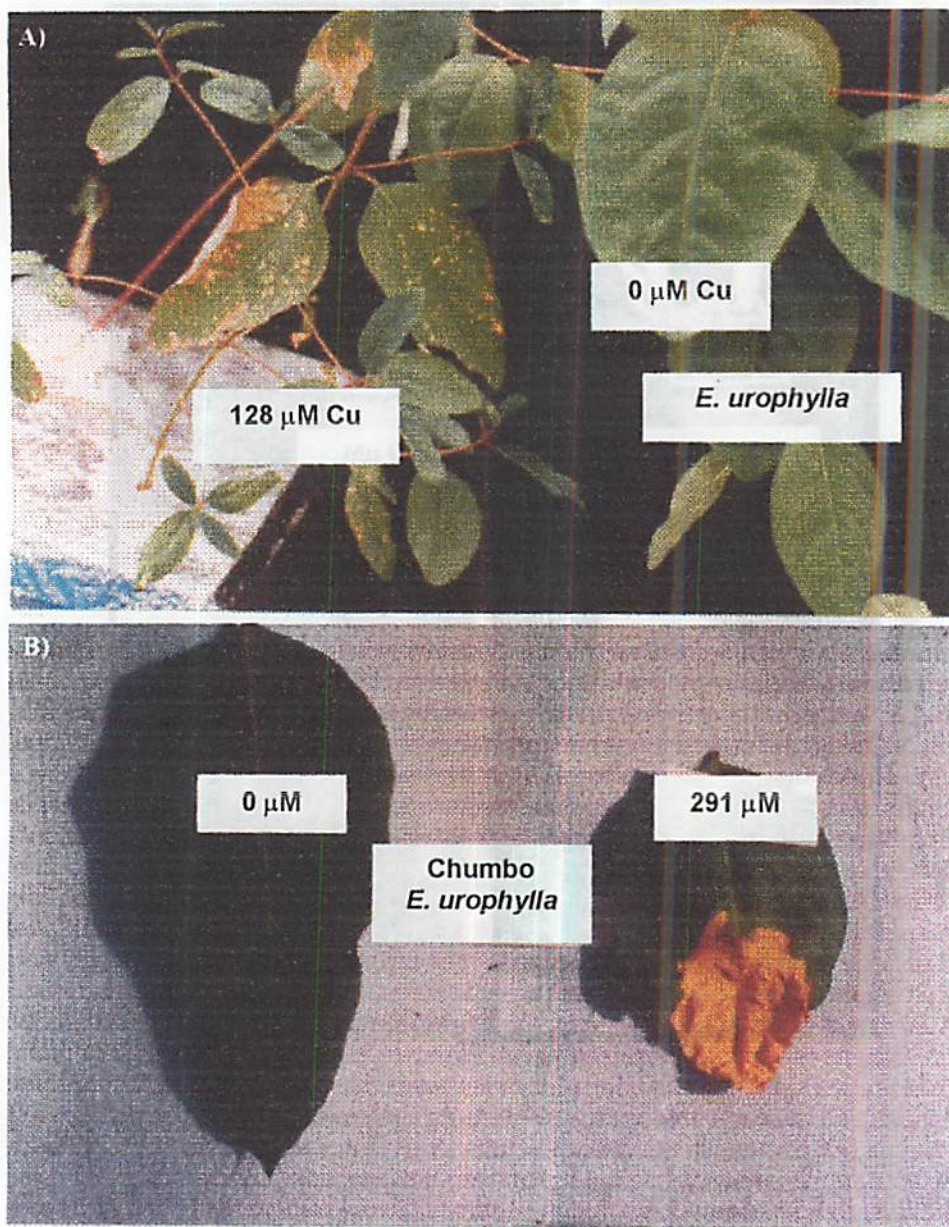


FIGURA 2. Sintomas de toxidez de Cu e Pb em mudas de *E. urophylla*. A) manchas aquosas que se tornam necróticas; B) necrose na ponta das folhas

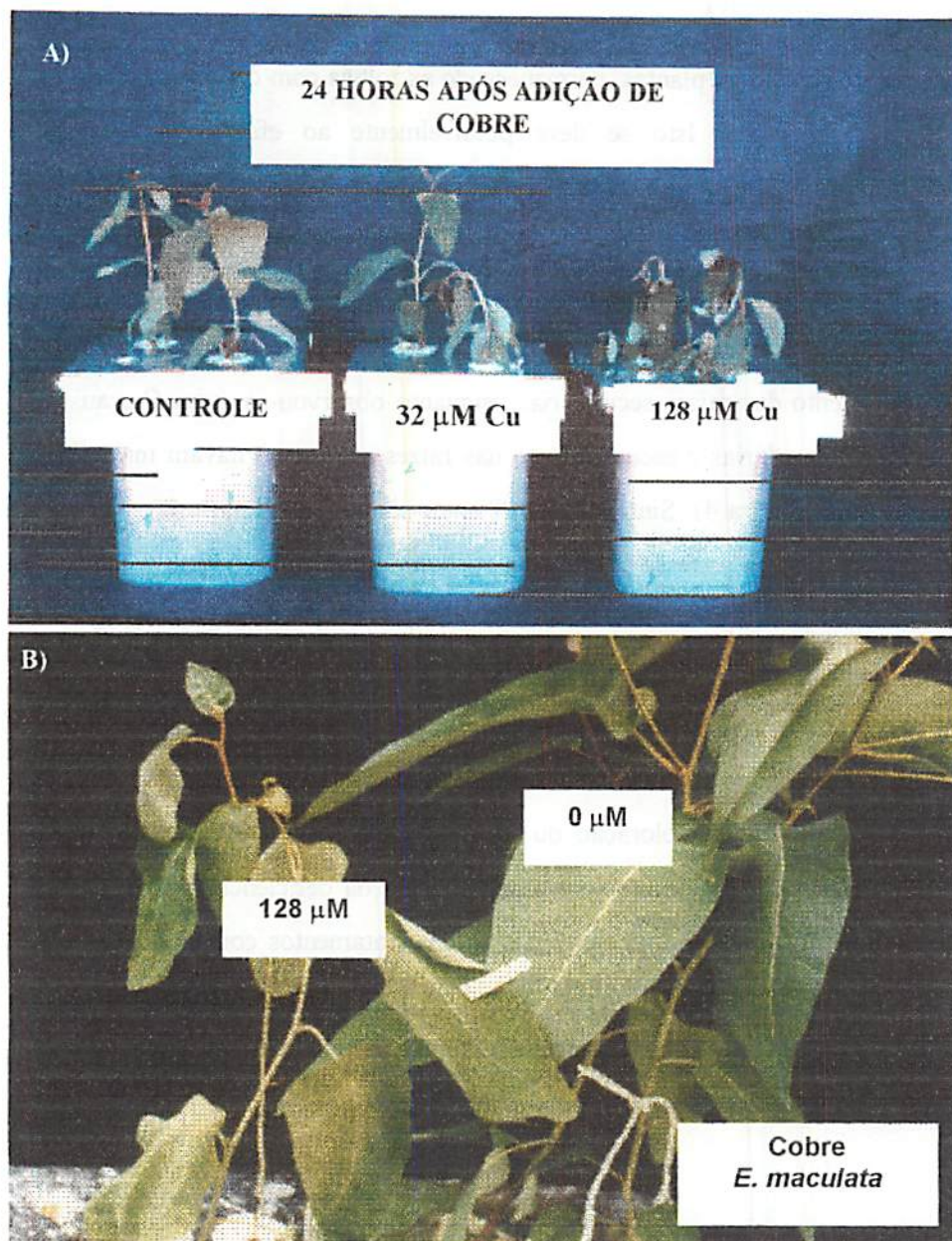


FIGURA 3. Sintomas de toxidez de Cu em mudas de *E. maculata*. A) murchamento da planta 24 horas após adição do Cu; B) redução no crescimento, murchamento foliar e clorose internerval 5 semanas após adição do Cu

completamente desprovida destas (Figura 1), enquanto no *E. maculata* ocorreu uma morte súbita das plantas, permanecendo as folhas com coloração esverdeada e aspecto coriáceo. Isto se deve possivelmente ao efeito dos metais na extensibilidade e/ou síntese de material da parede celular, conforme discutido em Barceló e Poschenrieder (1992).

Os principais sintomas de toxidez verificados nas raízes são apresentados na Tabela 4. De maneira geral, Zn, Cd e Pb promoveram encurtamento e engrossamento das raízes secundárias, enquanto observou-se, para Cu, ausência de raízes secundárias e escurecimento das raízes, que se tomavam mais finas e quebradiças (Figura 4). Sintomas semelhantes são relatados para *Acer rubrum* e *Pinus resinosa* sob estresse de Ni e Cu, atribuindo-se essa resposta típica a danos nas extremidades das raízes (Heale e Ormrod, 1982). A ação de metais pesados na formação de pêlos radiculares e raízes secundárias é visível na fase inicial de desenvolvimento. Isso pode reduzir a capacidade da planta de se fixar no substrato e de absorver nutrientes (Kahle, 1993). De acordo com Baccouch et al. (1998), alterações na coloração do sistema radicular e o desenvolvimento de raízes laterais curtas pode ser uma consequência da deficiência induzida de Ca. Observou-se, após 24 horas da aplicação dos tratamentos com Cu, Cd e Pb, o aparecimento de murchamento das folhas em toda a planta (Figura 3). Punz e Sieghardt (1993) comentam que isto resulta da limitação de absorção de água em decorrência da suberização e alterações nas raízes.

TABELA 4. Principais sintomas de toxidez de Zn, Cu, Cd e Pb nas raízes de mudas de *Eucalyptus maculata* (MAC) e *Eucalyptus urophylla* (URO) crescidas em solução nutritiva

Metal/Espécie	Sintomas de Toxidez
Zn - MAC	- Raízes pouco desenvolvidas em 400 μM - Escurecimento das raízes
Zn - URO	- Crescimento radicular reduzido nas doses acima de 400 μM , com ramificações pouco desenvolvidas - Escurecimento das raízes nas doses acima de 400 μM
Cu - MAC	- Raízes enegrecidas, finas e quebradiças nas doses acima de 32 μM
Cu - URO	- Raízes enegrecidas, finas e quebradiças nas doses acima de 64 μM
Cd - MAC	- Encurtamento e engrossamento das raízes secundárias em 90 μM - Escurecimento das raízes
Cd - URO	- Raízes curtas e grossas acima de 45 μM - Escurecimento das raízes
Pb - MAC	- Escurecimento das raízes em 97 μM - Encurtamento e engrossamento das raízes secundárias, nas doses acima de 97 μM
Pb - URO	- Escurecimento das raízes apenas nas doses mais altas (291 μM) - Encurtamento e engrossamento das raízes secundárias em 291 e 388 μM

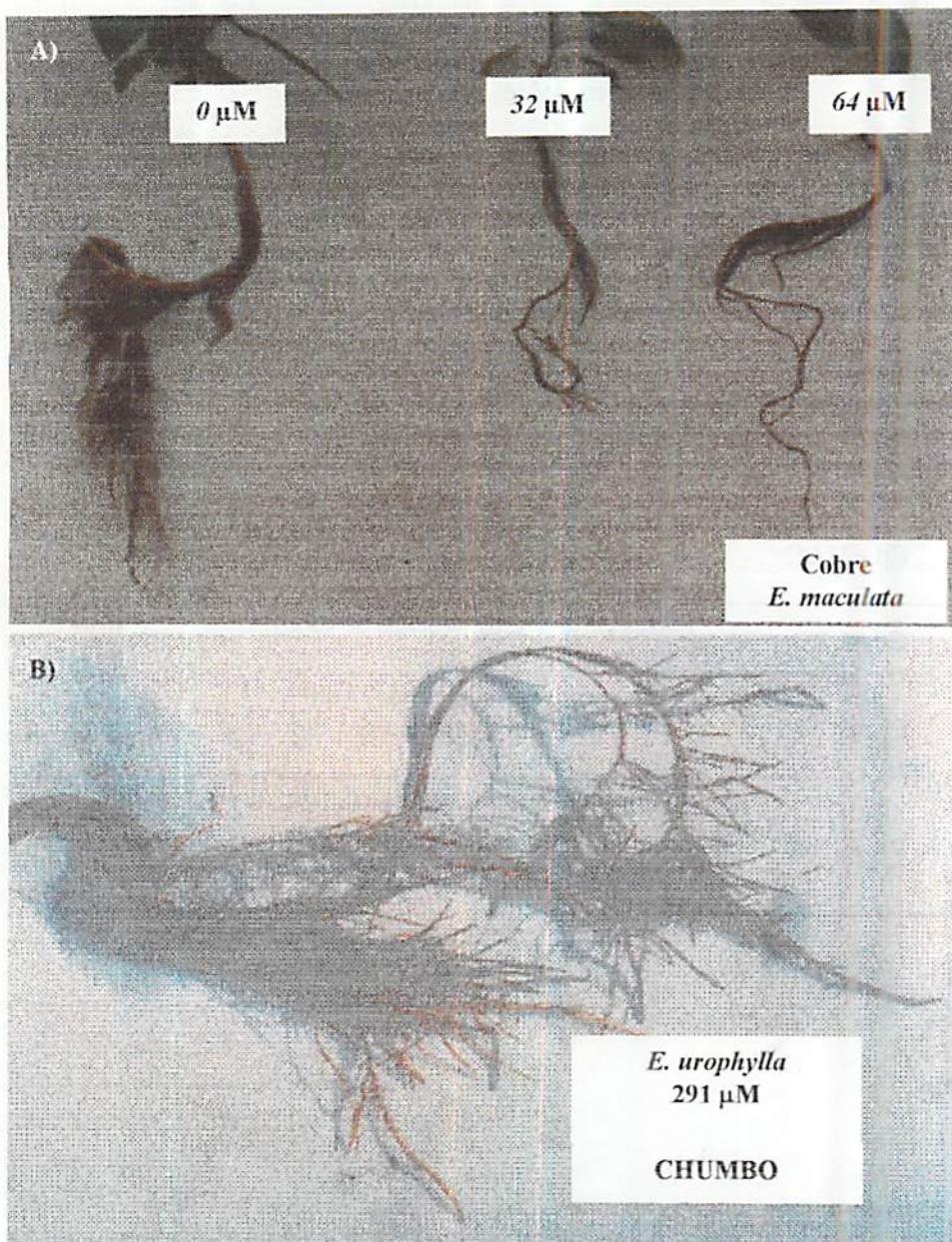


FIGURA 4. Sintomas de toxidez de Cu e Pb nas raízes de mudas de eucalipto. A) redução de crescimento com raízes finas e quebradiças em *E. maculata*; B) escurecimento e encurtamento das raízes secundárias em *E. urophylla*

4. 2. Efeitos no Crescimento e Doses Críticas de Toxidez

A elevação nas doses de Zn, Cu, Cd e Pb na solução nutritiva exerceu efeitos significativos sobre os diversos parâmetros vegetativos (Tabelas 1A a 4A). A matéria seca da parte aérea (PA) e raízes (R) e a razão R/PA diminuíram com o aumento das doses de Zn em solução, não ocorrendo efeito significativo para espécies para nenhum desses parâmetros (Figura 5). A dose 1600 μM Zn causou redução de 79% da matéria seca da parte aérea e de 97% na produção das raízes. Isso corrobora os resultados obtidos para R/PA, que apresentou queda em seus valores de 0,38 (controle) para 0,14 (1600 μM Zn), indicando que o Zn promove maior dano na produção de massa seca de raiz que na parte aérea destas duas espécies.

O efeito do Cu sobre estes parâmetros foi diferenciado para as espécies estudadas (Figura 6). *E. urophylla* não apresentou ajuste polinomial para matéria seca da parte aérea e área foliar (AF), observando-se redução acentuada a partir da primeira dose estudada (32 μM Cu). *E. maculata* mostrou resposta tipo raiz-quadrática com decréscimo de 66 e 72% da PA e AF, respectivamente, na dose de 32 μM Cu. Em relação às raízes, *E. urophylla* foi capaz de aumentar o comprimento total e manter a produção de matéria seca na dose de 32 μM Cu. No entanto, 64 μM Cu reduziu drasticamente esses parâmetros, mostrando que os limites de essencialidade e toxidez deste elemento para esta espécie estão muito próximos. Já no *E. maculata*, a dose mais baixa (32 μM) reduziu em 56% a matéria seca de raiz e em 45% o comprimento de raiz, indicando alta sensibilidade desta espécie ao Cu. As razões R/PA e C/MSR também foram afetadas pelo aumento das doses de Cu em solução. Houve pequeno incremento da R/PA em 32 μM e posterior decréscimo nas maiores doses, mostrando que o

efeito do Cu na produção de massa seca das raízes das espécies é mais prejudicial nas doses acima de 64 μM . A razão C/MSR de *E. urophylla* aumentou progressivamente com a elevação das doses de Cu, enquanto no *E. maculata* não houve efeito do Cu. Com isso, Cu exerce maior efeito na matéria seca das raízes de *E. urophylla* que no comprimento de raiz, enquanto o *E. maculata* não sofreu qualquer influência.

Cd exerceu efeito negativo acentuado no crescimento das plantas, sem ocorrer efeito significativo entre as espécies para a produção de matéria seca da parte aérea e área foliar (Figura 7). Na dose 180 μM Cd, houve redução de 75 e 94% nestes parâmetros, respectivamente. Para as raízes, observou-se diferença entre as espécies para o comprimento total e produção de matéria seca, com maior crescimento de *E. urophylla* no controle. No entanto, essa espécie apresentou maior redução desses parâmetros nas doses mais baixas de Cd do que *E. maculata*. Na dose de 45 μM Cd, *E. urophylla* apresentou decréscimo de 48% na matéria seca da raiz e de 41% do comprimento, enquanto em *E. maculata* houve decréscimo de 36 e 17%, respectivamente. A razão R/PA das espécies não foi influenciada pelas doses de Cd, indicando que as raízes e parte aérea foram igualmente afetadas. Verificou-se acréscimo na razão C/MSR com o aumento das doses de Cd, obtendo-se valores médios variando de 5,1 m/g no controle a 10,6 m/g em 180 μM Cd, mostrando que Cd afetou mais a matéria seca do que o comprimento das raízes.

O efeito das doses de Pb sobre o crescimento das duas espécies de eucalipto encontram-se na Figura 8. As doses mais elevadas promoveram decréscimo de até 82% na produção de matéria seca da parte aérea, não se observando efeito da espécie. Para a área foliar, houve efeito da espécie. *E. urophylla* apresentou maior área foliar na dose mais baixa de Pb (97 μM). No entanto, em alta dose, ambas espécies foram muito inibidas. *E. urophylla* não

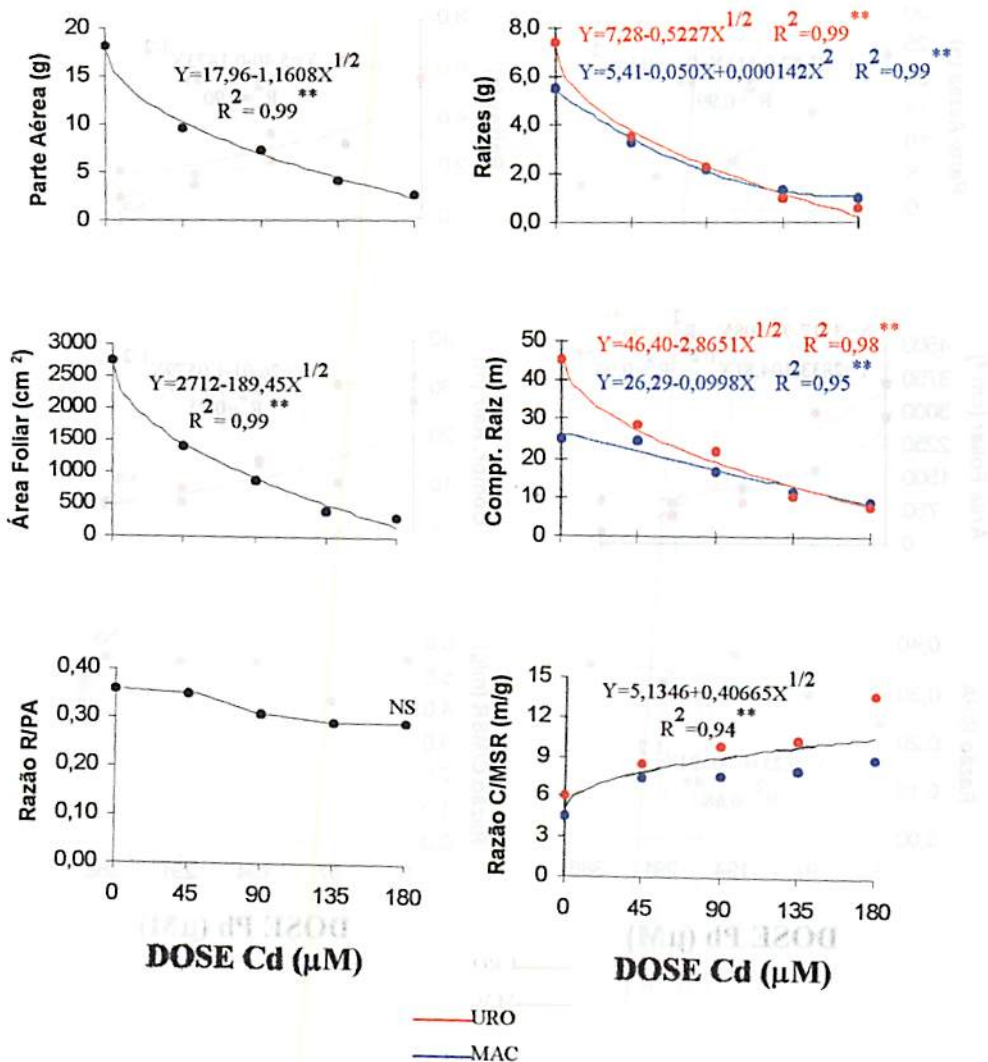
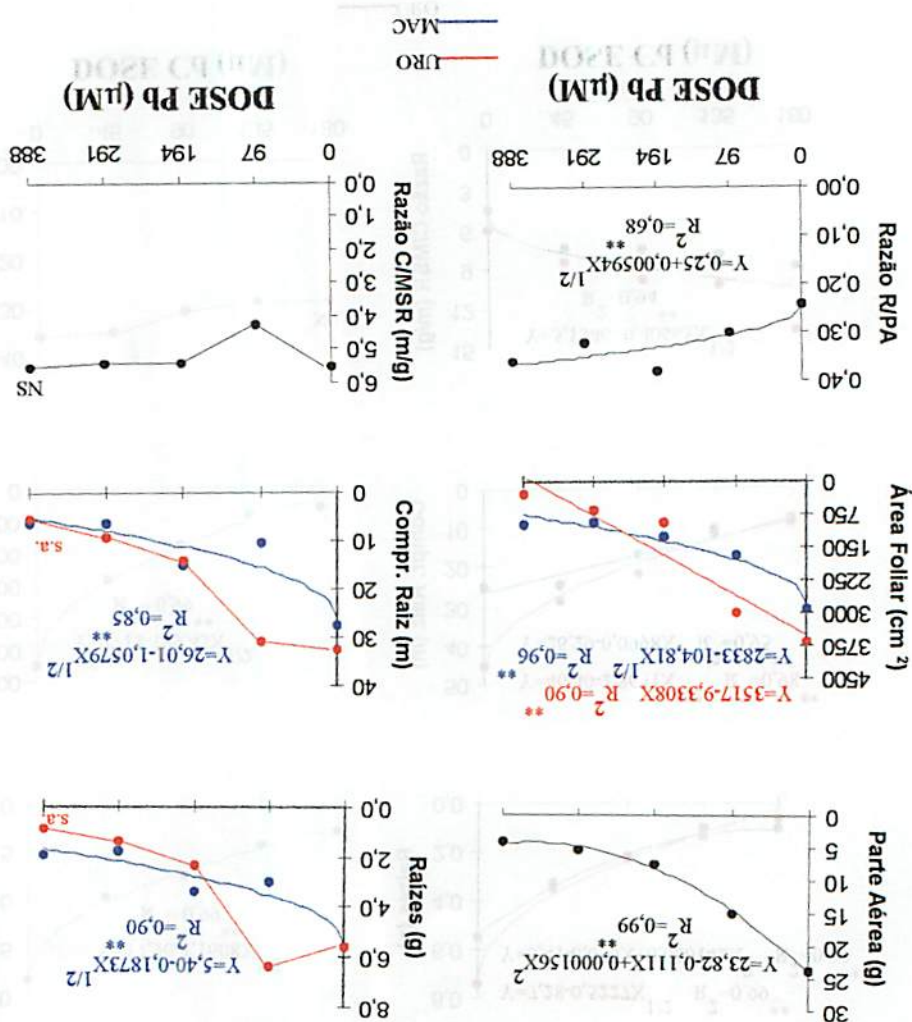


FIGURA 7. Matéria seca da parte aérea (PA) e raízes (R), área foliar (AF), comprimento de raiz (C) e razão R/PA e C/MSR de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Cd em solução nutritiva $**p \leq 0,01$; NS – não significativo

FIGURA 8. Matéria seca da parte aérea (PA) e raízes (R), área foliar (AF), comprimento de raiz (C) e razão R/PA e C/MSR de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Pb em solução nutritiva ** $p \leq 0,01$; NS - não significativo; s.a. - sem ajuste



presentes no sistema radicular capazes de promover a complexação do Cd na parede celular ou em outras estruturas apoplásticas (Marchiol et al., 1996). Os valores de DT_{50} para *E. maculata* e *E. urophylla* variaram de 44,7 a 63,1 μM Cd, os quais são superiores aos encontrados para cevada que, de acordo com Brune e Dietz (1995), foram de 30 μM . Portanto, as mudas de eucalipto destas espécies são mais tolerantes ao Cd que a cevada. As DCT de Pb variaram muito, mas indicam comportamentos distintos para as espécies, sendo de 18,9 μM para *E. maculata* e de 35,5 μM para a matéria seca da parte aérea de *E. urophylla*. Para as raízes, a DCT foi de apenas 4,2 μM para *E. maculata*, indicando a alta susceptibilidade das raízes desta espécie ao Pb, o que confirma os sintomas observados (Tabela 4). *E. urophylla* apresentou maiores valores de DCT para a parte aérea e raiz comparados a *E. maculata*, destacando-se o valor de 107,4 μM Pb para as raízes. Com isso, as raízes de *E. urophylla* são capazes de tolerar altas concentrações de Pb em solução. Isto resultou em aumento da massa seca das raízes na dose de 97 μM Pb (Figura 8).

Os valores de DCT como indicadores do grau de toxicidade dos metais nestas espécies de eucalipto são crescentes na seguinte ordem: $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Zn}$, sendo que *E. maculata* apresentou maior tolerância a Zn e Cd, enquanto *E. urophylla*, a Cu e Pb. Isto evidencia o comportamento distinto das espécies em relação a cada metal, o que certamente complica a interpretação sobre a resposta destas espécies em solos multi-contaminados com esses metais, como se tem abordado em outros estudos realizados com espécies arbóreas (Marques, 1996).

4. 3. Metais Pesados na Parte Aérea e Raízes: Concentração e Acúmulo

A elevação nas doses de metais pesados na solução nutritiva influenciou as concentrações destes elementos na matéria seca da parte aérea e raízes das mudas, sendo observados comportamentos diferenciados das espécies aos diferentes metais (Tabelas 5A a 12A).

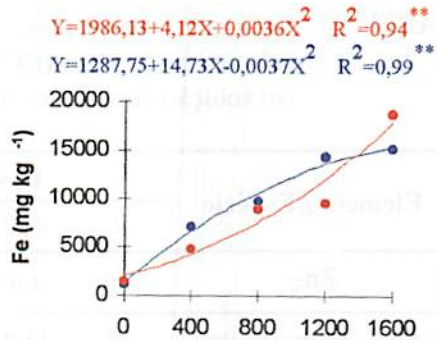
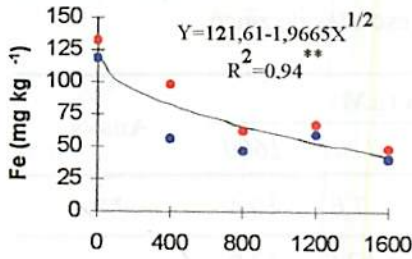
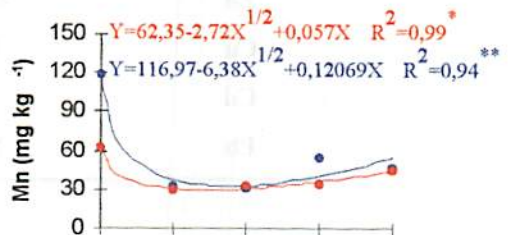
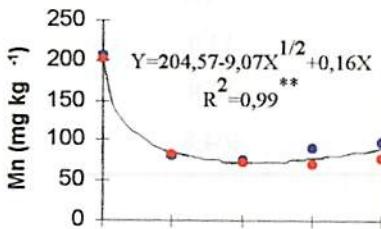
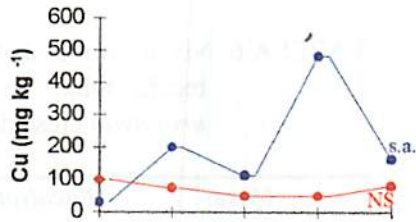
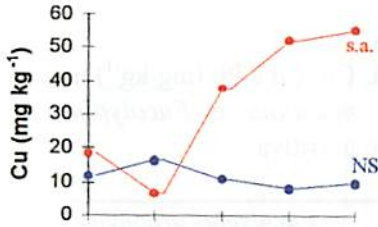
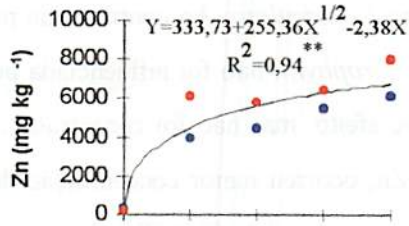
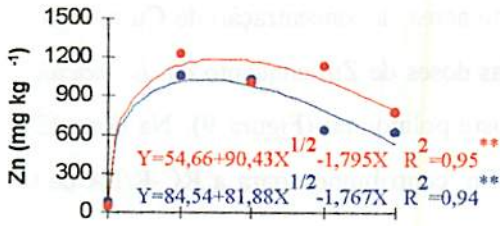
As concentrações de Zn na matéria seca da parte aérea foram maiores na *E. urophylla*, atingindo-se o máximo de 1194 mg kg⁻¹ na dose de 634 µM, enquanto para *E. maculata* a concentração máxima foi de 1033 mg kg⁻¹, obtida com a dose de 537 µM (Figura 9). Em comparação ao controle, a dose 400 µM Zn elevou em aproximadamente 200 vezes a concentração desse elemento na parte aérea de *E. urophylla* e em 11 vezes na *E. maculata*. Esse aumento da concentração de Zn nas folhas apresenta relação inversa com a redução da matéria seca da parte aérea (Figura 5). O nível crítico de toxidez (NCT) de Zn no tecido foliar de *E. maculata* foi de 853 mg kg⁻¹, portanto superior ao da *E. urophylla*, 697,8 mg kg⁻¹ (Tabela 6), indicando maior susceptibilidade ao Zn desta última em relação à primeira. Os NCT para este elemento nas mudas de eucalipto apresentam-se muito superiores a faixa de 100-400 mg kg⁻¹, considerada tóxica para o crescimento de várias espécies (Kabata-Pendias e Pendias, 1985).

A concentração de Zn na matéria seca das raízes aumentou progressivamente com a elevação das doses aplicadas, verificando-se concentrações de 333,73 mg kg⁻¹ no controle e de 6740 mg kg⁻¹ em 1600 µM Zn. Isto mostra relação positiva entre a concentração de Zn nas raízes e a capacidade de absorção desse elemento da solução. A razão das concentrações de Zn entre a matéria seca das raízes e da parte aérea (RC-R/PA) variou de 4,0 a 10,4 (Tabela 7), indicando alta retenção do elemento nas raízes quando a planta cresce com excesso desse elemento. Houve aumento na concentração de Cu na matéria seca da



PARTE AÉREA

RAIZ



DOSE Zn (µM)

DOSE Zn (µM)

— URO
 — MAC

FIGURA 9. Concentração de Zn, Cu, Mn e Fe na matéria seca da parte aérea e raiz em mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Zn em solução nutritiva. **p ≤ 0,01; *p ≤ 0,05; s.a. – sem ajuste; NS – não significativo

6 → 5
 folha 153
 1181

672%
 1481 - 153 x 100 =
 153
 150
 1 corte 33,3 → 150
 2 corte 657 → 251,4

parte aérea do *E. urophylla*, sendo as doses de Zn sem efeito na concentração de Cu no *E. maculata*. Ao contrário da parte aérea, a concentração de Cu nas raízes de *E. urophylla* não foi influenciada pelas doses de Zn, enquanto em *E. maculata* houve efeito, mas não foi encontrado ajuste polinomial (Figura 9). Na dose 1200 μM Zn, ocorreu maior concentração de Cu, contribuindo para a RC-R/PA de Cu alcançar valores de 62,8 (Tabela 7).

TABELA 6. Níveis críticos de toxidez de Zn, Cu, Cd e Pb (mg kg^{-1}) no tecido foliar de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* crescidas em solução nutritiva

Metal	<i>Eucalyptus maculata</i>	<i>Eucalyptus urophylla</i>
Zn	853,0	697,8
Cu	12,2	13,0
Cd	14,5	10,8
Pb	84,2	104,8

TABELA 7. Razão das concentrações de metais pesados entre a matéria seca das raízes e parte aérea (RC-R/PA) para mudas de eucalipto crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de zinco

Elemento/Espécie	Doses de Zn (μM)					Anava
	0	400	800	1200	1600	
Zn \bar{x}	4,0	4,4	5,2	7,6	10,4	**
Cu - <i>E. maculata</i>	2,8	13,4	10,2	62,8	17,0	**
Cu - <i>E. urophylla</i>	5,6	11,7	1,6	1,0	1,5	**
Mn \bar{x}	0,4	0,4	0,4	0,6	0,5	NS
Fe \bar{x}	11,5	91,9	182,9	213,4	387,0	**

\bar{x} - Valores médios das espécies

A dose mais baixa de Zn em solução (400 μM) foi suficiente para reduzir em 57% a concentração de Mn na matéria seca da parte aérea das espécies, não atingindo a faixa considerada de deficiência, que é de 12-15 mg kg^{-1} para *E. maculata* (Dell e Robinson, 1993) e de 5-16 mg kg^{-1} para *E. urophylla* (Dell, Malajczuk e Grove, 1995). A concentração de Mn nas raízes também reduziu drasticamente já na primeira dose de Zn (400 μM), onde ocorreu decréscimo de 68% em *E. maculata* e 51% em *E. urophylla*, ficando evidente a inibição competitiva entre o Zn e o Mn, fato este também observado em mudas de *Melaleuca leucadendra* (Grazziotti et al., 1999). A RC-R/PA do Mn não foi afetada pelo aumento das doses de Zn em solução com valores abaixo de um, indicando que a maior parte do Mn absorvido ficou retido na parte aérea (Tabela 7). A concentração de Fe na parte aérea das espécies foi altamente reduzida com o aumento das doses de Zn em solução, observando-se redução de 65% na dose 1600 μM . A concentração de Fe na parte aérea do *E. urophylla* está abaixo da faixa de concentração de 52-97 mg kg^{-1} considerada adequada para o crescimento dessa espécie (Dell, Malajczuk e Grove, 1995). Segundo Woolhouse (1983), o antagonismo entre Zn e Fe é resultante da semelhança dos raios iônicos desses elementos (0,083 nm). Observou-se comportamento diferenciado das espécies para a concentração de Fe nas raízes, ocorrendo aumento da concentração desse elemento com a elevação da dose de Zn, mostrando que elevadas doses de Zn não afetam a absorção de Fe e sim a translocação do Fe absorvido para a parte aérea (Figura 9). Isto é evidente nos valores da RC-R/PA (Tabela 7), que passaram de 11,5 para 387,0, em que o Fe foi retido preferencialmente nas raízes. Portanto, a elevação nas doses de Zn reduziram marcadamente a concentração de Mn e Fe nas plantas de eucalipto (Tabela 26A).

O efeito das doses de Zn sobre o acúmulo de metais pesados na parte aérea e raízes encontra-se nas Tabelas 14A e 15A. A quantidade acumulada de Zn

na parte aérea e raízes de ambas espécies foram maiores na dose de 400 μM e sem influência da espécie e ajuste polinomial. A partir dessa dose de Zn, houve queda no acúmulo devido ao decréscimo na matéria seca (Figura 5). De maneira geral, o acúmulo de Cu, Mn e Fe nos tecidos das espécies sofreu redução de seus valores com a elevação de Zn em solução, exceção feita para Fe nas raízes e Cu nas raízes de *E. maculata* na dose de 400 μM Zn (Figura 10).

O aumento das doses de Zn exerceu efeitos significativos sobre os índices de translocação (IT) dos metais pesados (Tabela 22A). As doses de Zn influenciaram de modo diferenciado a translocação dos diversos elementos (Tabela 8).

TABELA 8. Índices de translocação (%) de metais pesados para *E. maculata* (MAC) e *E. urophylla* (URO) crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de zinco

	$\text{Zn}_{\bar{x}}$	Cu		Mn		$\text{Fe}_{\bar{x}}$	
		MAC	URO	MAC	URO		
	0	43 b	48 a	34 b	81 b	90 a	21 a
	400	52 ab	28 bc	29 b	92 a	92 a	7 b
Zn (μM)	800	55 a	39 ab	79 a	94 a	93 a	4 bc
	1200	52 ab	15 c	85 a	94 a	92 a	4 bc
	1600	44 b	34 ab	83 a	95 a	93 a	2 c

\bar{x} - Valores médios das espécies

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si (Tukey 5%)

O IT do Zn foi elevado com valores superiores a 40%, o que indica alta capacidade do Zn em translocar das raízes para a parte aérea do eucalipto. Porém, o IT não variou de modo consistente com a elevação nas doses desse metal em solução. Os IT de Cu e Mn apresentaram comportamento diferenciado para as espécies. *E. maculata* apresentou decréscimo no IT de Cu e aumento no IT de Mn,

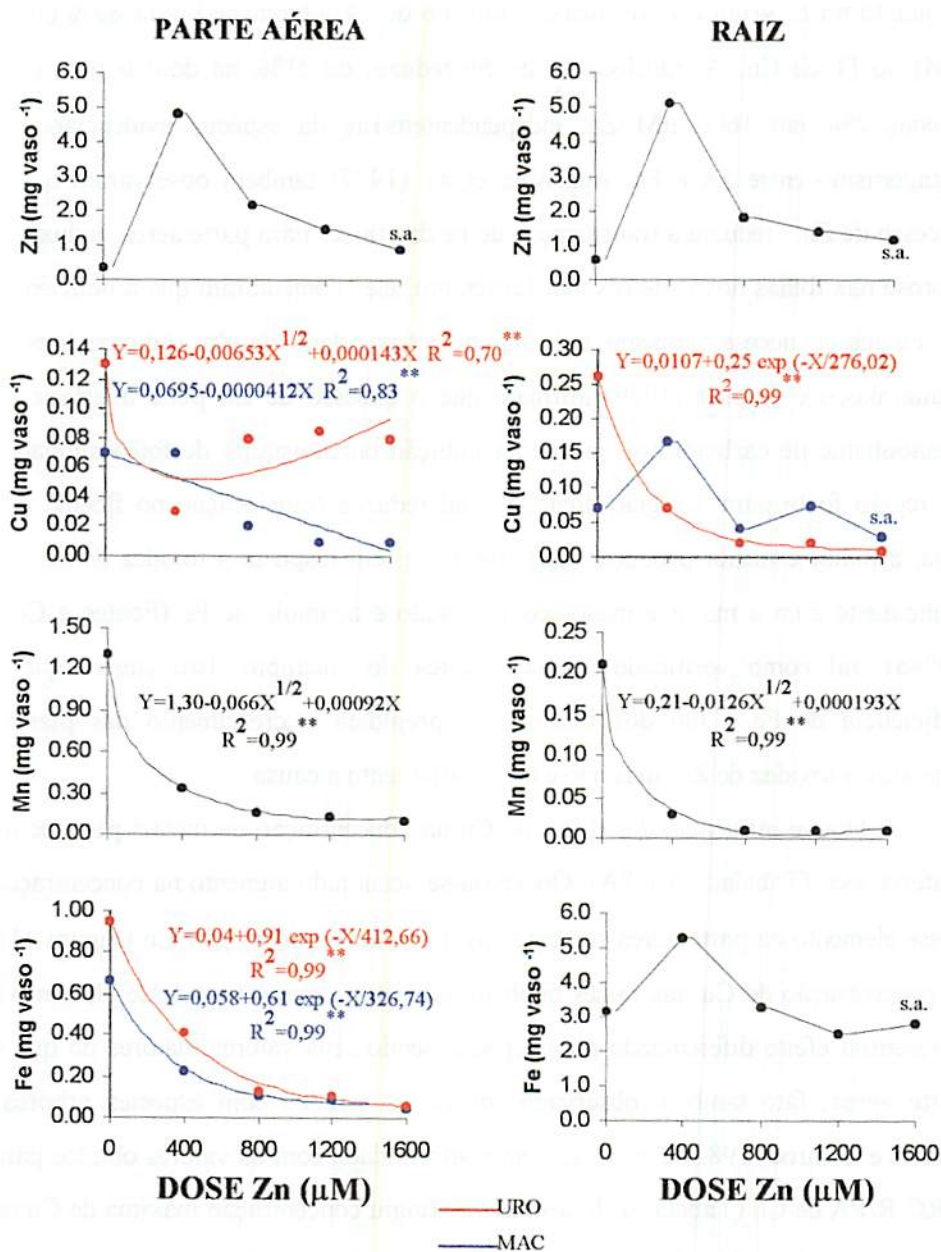


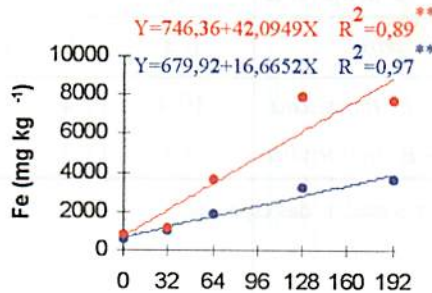
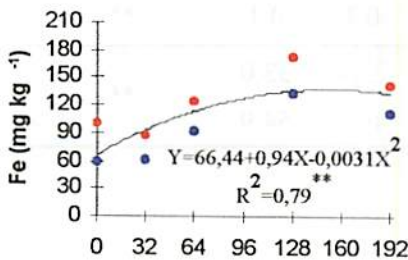
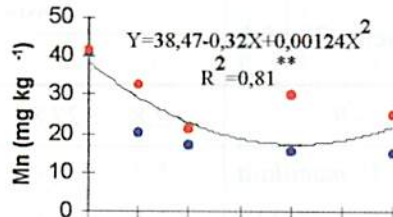
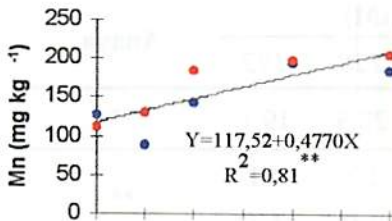
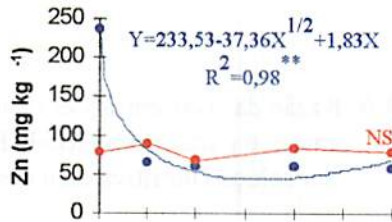
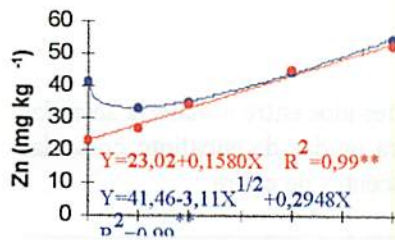
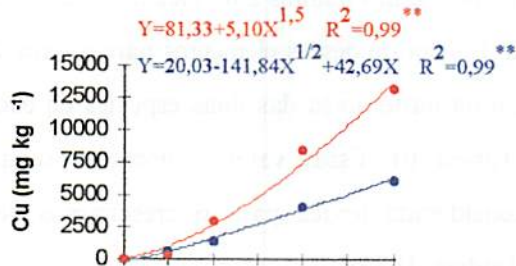
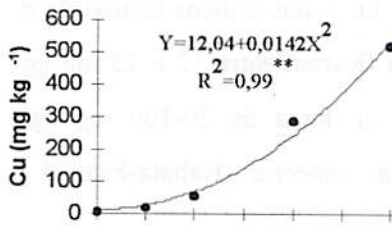
FIGURA 10. Acúmulo de Zn, Cu, Mn e Fe na parte aérea e raízes de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Zn em solução nutritiva. ** $p \leq 0,01$; s.a. – sem ajuste polinomial

enquanto no *E. urophylla* verifica-se aumento de 34% (controle) para 83% (1600 μM) no IT de Cu. A translocação do Fe reduziu de 21%, na dose 0 μM , para apenas 2%, em 1600 μM Zn, independentemente da espécie, evidenciando o antagonismo entre Zn e Fe. Agarwala et al. (1977) também observaram que o excesso de Zn^{2+} reduziu a translocação de Fe das raízes para parte aérea, induzindo clorose nas folhas novas de cevada. Entretanto, eles comentaram que a deficiência de Fe não é necessariamente induzida pela toxicidade de Zn. Adicionalmente, Samarakoon e Rauser (1979) afirmam que o excesso de Zn pode interferir no metabolismo de carboidratos, já que há inibição do transporte de fotoassimilados da região fonte para a região dreno, o qual reduz a translocação no floema. Na soja, a maior e menor produção da parte aérea, em resposta à toxidez de Zn, foi coincidente com a maior e menor concentração e acúmulo de Fe (Fontes e Cox, 1998a), tal como verificado na parte aérea do eucalipto. Isto sugere que a deficiência de Fe é um dos fatores que prejudica o crescimento das plantas expostas à toxidez de Zn, mas não é necessariamente a causa.

Houve influência das doses de Cu na concentração de metais pesados na matéria seca (Tabelas 7A e 8A). Observou-se acentuado aumento na concentração desse elemento na parte aérea somente nas doses acima de 64 μM Cu (Figura 11). A concentração de Cu nas raízes também aumentou com a dose desse elemento e apresentou efeito diferenciado para espécie, sendo seus valores maiores do que a parte aérea, fato também observado em vários estudos com espécies arbóreas (Heale e Ormrod, 1982) e que estão em conformidade com os valores obtidos para a RC-R/PA de Cu (Tabela 9). *E. urophylla* atingiu concentração máxima de Cu na matéria seca das raízes de 13650 mg kg^{-1} , enquanto *E. maculata* apresentou apenas 6250 mg kg^{-1} . Esta maior capacidade de retenção de Cu apresentada por *E. urophylla* pode explicar a maior tolerância dessa espécie a esse metal, como mostrado na DCT (Tabela 5), uma vez que, segundo Yang et al. (1995), a maior

PARTE AÉREA

RAIZ



DOSE Cu (μM)

DOSE Cu (μM)

— URO
— MAC

FIGURA 11. Concentração de Cu, Zn, Mn e Fe na matéria seca da parte aérea e raiz de mudas de eucalypto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Cu em solução nutritiva. ** $p \leq 0,01$; NS – não significativo

tolerância das plantas à toxidez de metais pesados está relacionada com a restrição do transporte desses elementos para a parte aérea. Os níveis críticos de toxidez de Cu na parte aérea das duas espécies de eucalipto ficaram entre 12 e 13 mg kg⁻¹ (Tabela 6). Esses valores encontram-se abaixo da faixa de 20-100 mg kg⁻¹, considerada tóxica para o crescimento de várias espécies (Kabata-Pendias e Pendias, 1985).

TABELA 9. Razão das concentrações de metais pesados entre a matéria seca das raízes e parte aérea (RC-R/PA) para mudas de eucalipto crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de cobre

Elemento/Espécie	Doses de Cu (µM)					Anava
	0	32	64	128	192	
$Cu_{\bar{x}}$	2,8	27,8	49,0	28,3	19,1	**
Zn - <i>E. maculata</i>	5,7	1,9	1,7	1,3	1,1	**
Zn - <i>E. urophylla</i>	3,5	3,4	2,0	1,9	1,5	
$Mn_{\bar{x}}$	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	**
Fe - <i>E. maculata</i>	10,4	17,4	21,3	23,4	33,0	**
Fe - <i>E. urophylla</i>	9,3	13,3	29,3	46,3	54,9	

\bar{x} - Valores médios das espécies

As doses de Cu promoveram aumentos lineares na concentração de Zn em *E. urophylla* e pequena redução no *E. maculata* na dose de 32 µM Cu, com posterior elevação nas doses mais altas (Figura 11). Esse decréscimo na concentração de Zn na parte aérea pode ser provavelmente devido ao efeito de inibição no processo de absorção, enquanto a elevação resulta do efeito de concentração de Zn em função da redução da produção de massa seca da parte

aérea em resposta as doses de Cu (Figura 6). As raízes de *E. maculata* apresentaram decréscimo de até 65% na concentração de Zn na dose 32 μM , enquanto *E. urophylla* não foi afetado pelas doses de Cu em solução. A RC-R/PA de Zn foi diferenciada para as espécies (Tabela 9). *E. maculata* apresentou maior decréscimo nos valores de RC-R/PA do que *E. urophylla*, indicando que *E. maculata* possui maior competitividade entre Cu e Zn. Isto pode explicar a redução da concentração de Zn na parte aérea na dose de 32 μM Cu (Figura 11). Gussarsson et al. (1995) afirmam que íons de mesma valência podem competir por sítios de absorção, limitando assim a absorção de um ao outro. Observou-se aumento linear na concentração de Mn na parte aérea em resposta ao aumento das doses de Cu. Em ambas espécies, a concentração de Mn nas raízes reduziu em até 55% atingindo-se o mínimo de 17,29 mg kg^{-1} na dose 131 μM Cu (Figura 11). A razão RC-R/PA de Mn sofreu redução com a elevação nas doses de Cu, passando de 0,4 (controle) para 0,1 (192 μM). Isto indica que o Mn é mais retido na parte aérea (Tabela 9).

Resposta quadrática foi observada para a concentração de Fe na parte aérea, atingindo valores médios de 125,54 mg kg^{-1} em *E. urophylla* e de 91,38 mg kg^{-1} em *E. maculata*. Em ambas espécies, ocorreu incremento da concentração de Fe em função do aumento das doses de Cu em solução, devido, provavelmente, ao efeito de concentração. A concentração de Fe nas raízes apresentou resposta linear positiva, havendo maior incremento em *E. urophylla* (1083%) do que *E. maculata* (471%) (Figura 11). Isso pode também ser observado através dos valores de RC-R/PA de Fe, onde *E. urophylla* apresentou valor máximo de 54,9, enquanto *E. maculata*, apenas 33,0. Esses valores mostram a maior retenção do Fe nas raízes, reduzindo sua translocação para a parte aérea (Tabela 9).

O aumento das doses de Cu em solução também influenciou o acúmulo de metais pesados nos tecidos (Tabelas 15A e 16A). Houve incremento na quantidade

acumulada de Cu na parte aérea e raízes, indicando que o acúmulo desse metal é mais dependente da sua concentração nos tecidos do que a produção de matéria seca, uma vez que ambos aumentaram com os tratamentos. O incremento da quantidade acumulada de Cu na parte aérea foi maior apenas nas doses acima de 64 μM Cu, mostrando que o sistema radicular das espécies possui mecanismo de restrição do transporte desse elemento nas doses mais baixas em solução. Nas doses mais elevadas de Cu, o aumento do acúmulo pode ser devido ao influxo passivo, sugerindo que a toxicidade desse elemento foi excedida e que a seletividade da membrana foi perdida (Arduini et al., 1996). Em geral, o acúmulo de Zn, Mn e Fe nos tecidos sofreu decréscimo em seus valores em função do aumento das doses de Cu em solução (Figura 12).

O aumento das doses de Cu exerceu efeitos significativos sobre os índices de translocação (IT) dos metais pesados (Tabela 23A). O IT de Cu não variou de modo consistente com o aumento das doses desse elemento sem efeito diferenciado para as espécies (Tabela 10). Os tratamentos contendo Cu adicional apresentaram IT máximo de 25%, confirmando que as raízes são uma barreira efetiva para a translocação do Cu para a parte aérea (Kabata-Pendias e Pendias, 1985; Arduini et al., 1996). Os IT de Zn e Mn aumentaram em resposta a elevação das doses de Cu, verificando-se comportamento diferenciado das espécies apenas para o Zn. O IT de Fe foi reduzido de 27% na dose 0 μM para apenas 12% em 192 μM Cu, caracterizando a alta interferência do Cu na translocação do Fe. Segundo Schmidt et al. (1997), a observação de clorose nas folhas novas de plantas sob toxidez de Cu é frequentemente associada com a inibição da translocação de Fe das raízes para a parte aérea.

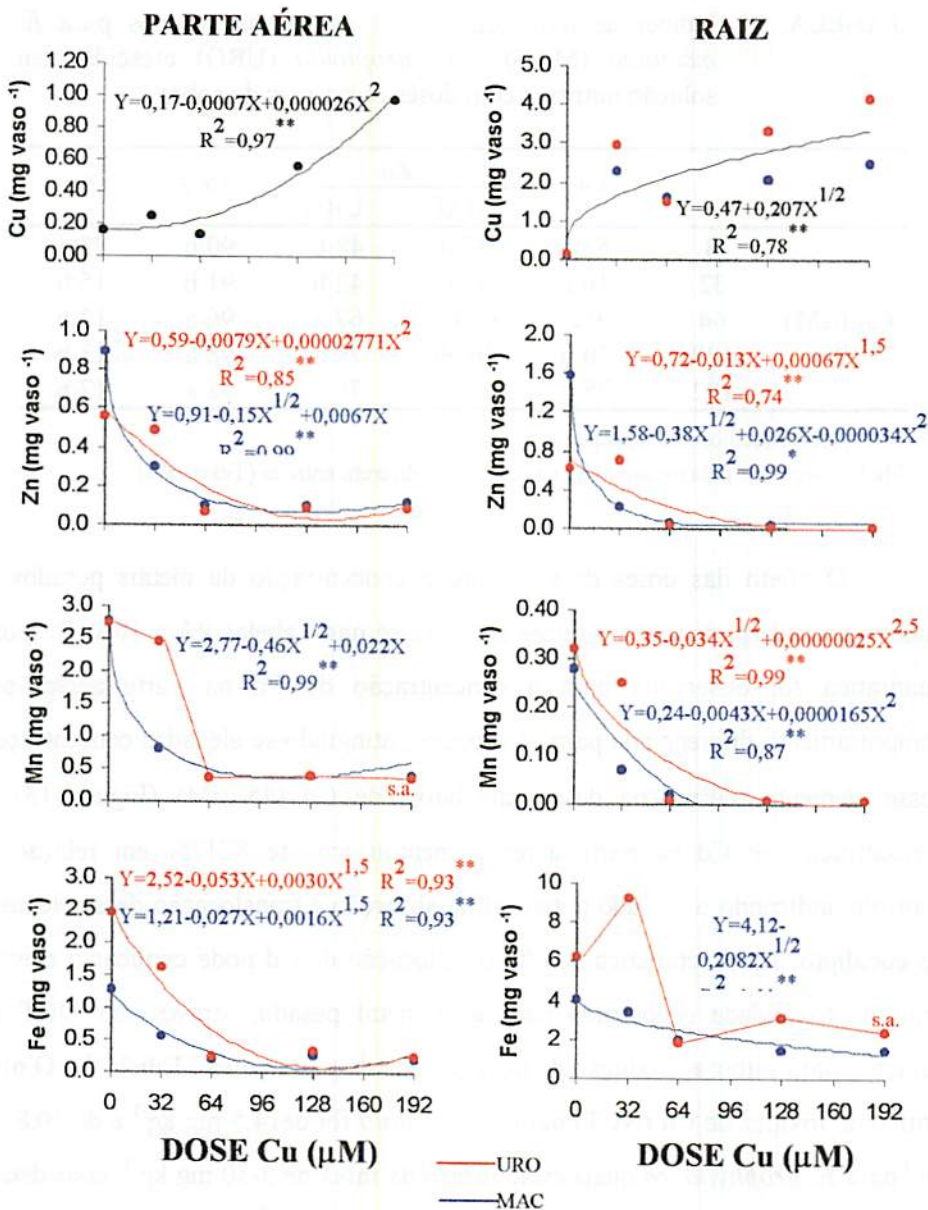


FIGURA 12. Acúmulo de Cu, Zn, Mn e Fe na parte aérea e raízes de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Cu em solução nutritiva. ** $p \leq 0,01$; * $p \leq 0,05$; s.a. – sem ajuste polinomial

TABELA 10. Índices de translocação (%) de metais pesados para *E. maculata* (MAC) e *E. urophylla* (URO) crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de cobre

	$Cu_{\bar{x}}$	Zn		$Mn_{\bar{x}}$	$Fe_{\bar{x}}$	
		MAC	URO			
	0	54 a	37 d	48 b	90 b	27 a
	32	10 c	57 c	42 b	91 b	15 b
Cu (μM)	64	9 c	61 bc	67 a	96 a	12 b
	128	20 b	76 ab	73 a	98 a	13 b
	192	25 b	82 a	79 a	98 a	12 b

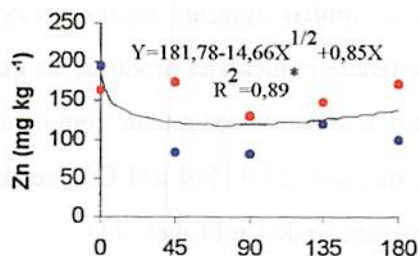
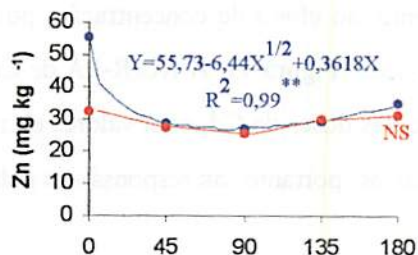
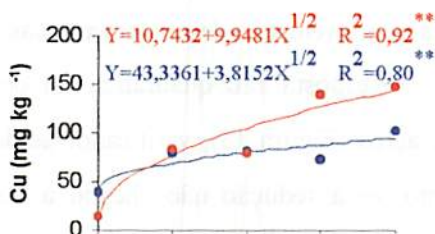
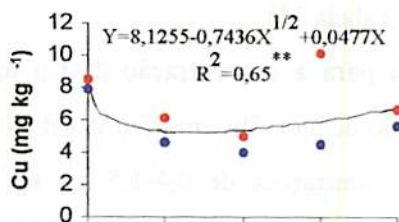
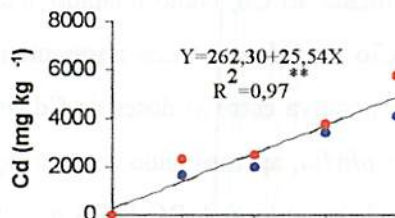
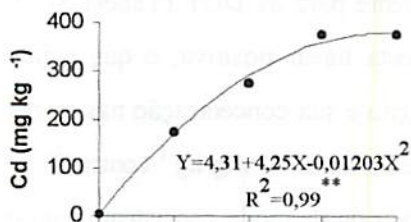
\bar{x} - Valores médios das espécies

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si (Tukey 5%)

O efeito das doses de Cd sobre a concentração de metais pesados na matéria seca da parte aérea e raízes encontra-se nas Tabelas 9A e 10A. Resposta quadrática foi observada para a concentração de Cd na parte aérea, sem comportamento diferenciado para as espécies, atingindo-se elevadas concentrações desse elemento mesmo na dose mais baixa de Cd (45 μM) (Figura 13). A concentração de Cd na parte aérea aumentou em até 8717% em relação ao controle, indicando o elevado potencial de absorção e translocação desse elemento no eucalipto. A característica de alta translocação de Cd pode explicar o elevado grau de toxicidade encontrado para esse metal pesado, através das DCT em solução, para inibir a produção de matéria seca da parte aérea (Tabela 5). O nível crítico de toxidez de Cd (NCT) para *E. maculata* foi de 14,5 $mg\ kg^{-1}$ e de 10,8 $mg\ kg^{-1}$ para *E. urophylla*, os quais estão dentro da faixa de 5-30 $mg\ kg^{-1}$, considerada tóxica para o crescimento de várias espécies (Kabata-Pendias e Pendias, 1985). Em plantas muito sensíveis como soja, alfafa, feijão ou cevada, o NCT variou de 5-10 $mg\ kg^{-1}$ Cd, enquanto em plantas menos sensíveis (alface, tomate, nabo, milho e repolho), o NCT variou de 50-200 $mg\ kg^{-1}$ (Macnicol e Beckett, 1985). Através

PARTE AÉREA

RAIZ



DOSE Cd (μM)

DOSE Cd (μM)

— URO
— MAC

FIGURA 13. Concentração de Cd, Cu e Zn na matéria seca da parte aérea e raiz de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Cd em solução nutritiva. ** $p \leq 0,01$; * $p \leq 0,05$; NS – não significativo

desses valores, pode-se observar que as espécies de eucalipto apresentam alta susceptibilidade ao Cd, como relatado anteriormente para as DCT (Tabela 5). A concentração de Cd nas raízes apresentou resposta linear positiva, o que indica correlação positiva entre as doses de Cd em solução e sua concentração nas raízes com *E. urophylla*, apresentando concentração média de 2884 mg kg⁻¹ contra 2237 mg kg⁻¹ de *E. maculata*. A RC-R/PA de Cd não variou de modo consistente com o aumento das doses de Cd, obtendo-se valores que variam de 3,0 a 16,6, o que indica maior retenção desse elemento nas raízes (Tabela 11).

Resposta raiz-quadrática foi observada para a concentração de Cu na parte aérea (Figura 13), verificando-se decréscimo de até 35% em 45 µM Cd. No entanto, essa redução não chegou a atingir concentrações de 0,4-1,5 mg kg⁻¹, consideradas deficientes para o crescimento das espécies (Dell e Robinson, 1993; Dell, Malajczuk e Grove, 1995). Nas raízes, o Cd proporcionou incremento do teor de Cu em ambas espécies devido, provavelmente, ao efeito de concentração, pois foi verificada redução na produção de matéria seca (Figura 7). A RC/R-PA de Cu não variou de modo consistente com o aumento das doses de Cd, com valores entre 3,4 (controle) e 22,0 (180 µM Cd), sendo as raízes, portanto, as responsáveis pela maior retenção de Cu (Tabela 11).

A concentração de Zn na parte aérea de *E. maculata* apresentou resposta do tipo raiz-quadrática, com acentuada redução de 48% na dose de 45 µM Cd, enquanto *E. urophylla* não foi afetada significativamente pelas doses de Cd. A concentração de Zn nas raízes também apresentou resposta raiz-quadrática com redução mesmo nas doses mais baixas de Cd, podendo-se atribuir esta resposta à inibição no processo de absorção (Figura 13). A RC-R/PA de Zn não foi influenciada pelas doses de Cd, indicando que houve um decréscimo proporcional nas concentrações de Zn entre a matéria seca da parte aérea e raízes (Tabela 11).

TABELA 11. Razão das concentrações de metais pesados entre a matéria seca das raízes e parte aérea (RC-R/PA) para mudas de eucalipto crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de cádmio

Elemento/Espécie	Doses de Cd (μM)					Anava
	0	45	90	135	180	
$\text{Cd}_{\bar{x}}$	3,0	11,5	8,4	10,3	16,6	**
$\text{Cu}_{\bar{x}}$	3,4	15,2	18,1	15,7	22,0	**
$\text{Zn}_{\bar{x}}$	4,3	4,7	4,0	4,7	4,6	NS
Mn – <i>E. maculata</i>	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	**
Mn – <i>E. urophylla</i>	0,2	0,5	0,3	0,3	0,3	
Fe – <i>E. maculata</i>	5,7	9,6	13,9	21,0	20,6	*
Fe – <i>E. urophylla</i>	5,1	13,7	11,5	29,2	45,6	

\bar{x} - Valores médios das espécies

A concentração de Mn na parte aérea também sofreu acentuado decréscimo de 59% na dose de 45 μM Cd, não atingindo, entretanto, a faixa considerada de deficiência de 12-15 mg kg⁻¹ para *E. maculata* (Dell e Robinson, 1993) e de 5-16 mg kg⁻¹ para *E. urophylla* (Dell, Malajczuk e Grove, 1995). Assim como observado na parte aérea, houve redução na concentração de Mn nas raízes com comportamento diferenciado das espécies, verificando-se decréscimo de até 75% em *E. maculata* e de 48% em *E. urophylla*, mostrando forte competitividade entre o Cd e Mn (Figura 14). A RC-R/PA de Mn também foi diferenciada para as espécies, obtendo-se valores abaixo de um, o que indica maior retenção desse nutriente na parte aérea (Tabela 11). A concentração de Fe na matéria seca da parte aérea foi pouco influenciada pelas doses de Cd, ocorrendo pequena redução nas doses intermediárias de Cd. Ao contrário da parte aérea, a

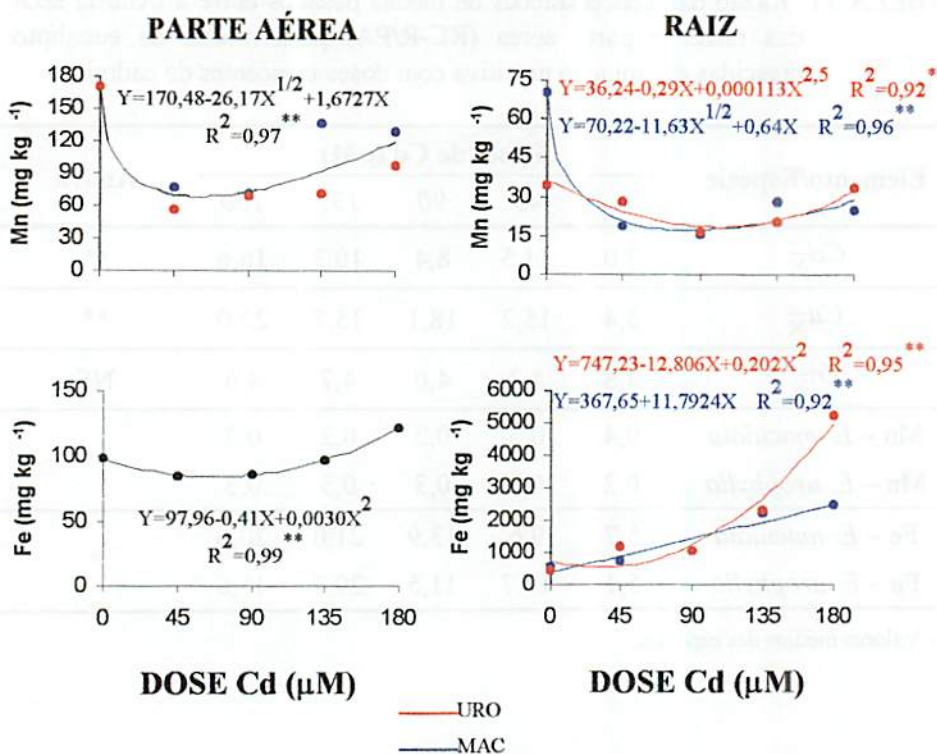


FIGURA 14. Concentração de Mn e Fe na matéria seca da parte aérea e raiz de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Cd em solução nutritiva. $^{**}p \leq 0,01$; $^*p \leq 0,05$

concentração de Fe nas raízes apresentou interação entre os fatores estudados, mostrando comportamento diferenciado das espécies. *E. urophylla* apresentou maior concentração de Fe nas doses mais altas de Cd em comparação a *E. maculata* (Figura 14). A RC-R/PA de Fe também apresentou comportamento diferenciado para as espécies, verificando-se incremento da RC-R/PA em resposta à elevação das doses de Cd com valores entre 5,1 e 45,6, o que indica maior retenção do Fe nas raízes (Tabela 11).

Os efeitos do aumento das doses de Cd sobre o acúmulo de metais pesados na matéria seca da parte aérea e raízes são apresentados nas Tabelas 18A e 19A. A quantidade acumulada de Cd na parte aérea e raízes apresentaram resposta do tipo raiz-quadrática com incremento nas doses mais baixas de Cd (Figura 15) devido, principalmente, ao aumento na concentração desse elemento nos tecidos (Figura 13). As doses mais elevadas de Cd reduziram o acúmulo desse metal nos tecidos em decorrência da diminuição no crescimento das plantas (Figura 7). De maneira geral, houve também decréscimo na quantidade acumulada de Cu, Zn, Mn e Fe nos tecidos (Figuras 15 e 16), causado, em parte, pela diminuição no crescimento das plantas, embora, em alguns casos, tenha havido decréscimo nas concentrações desses elementos nos tecidos. No entanto, *E. urophylla* aumentou o acúmulo de Cu e Fe nas raízes em 45 μM Cd devido ao incremento na concentração desses elementos no tecido. A quantidade acumulada de Fe nas raízes de *E. maculata* não foi afetada significativamente pelas doses de Cd, indicando comportamento inverso entre a produção de matéria seca das raízes e a concentração de Fe no tecido.

A influência das doses de Cd sobre os índices de translocação (IT) de metais pesados das raízes para parte aérea é mostrada na Tabela 24A. O IT de Cd não variou de modo consistente com elevação nas doses desse elemento na solução, verificando-se comportamento diferenciado entre as espécies (Tabela 12).

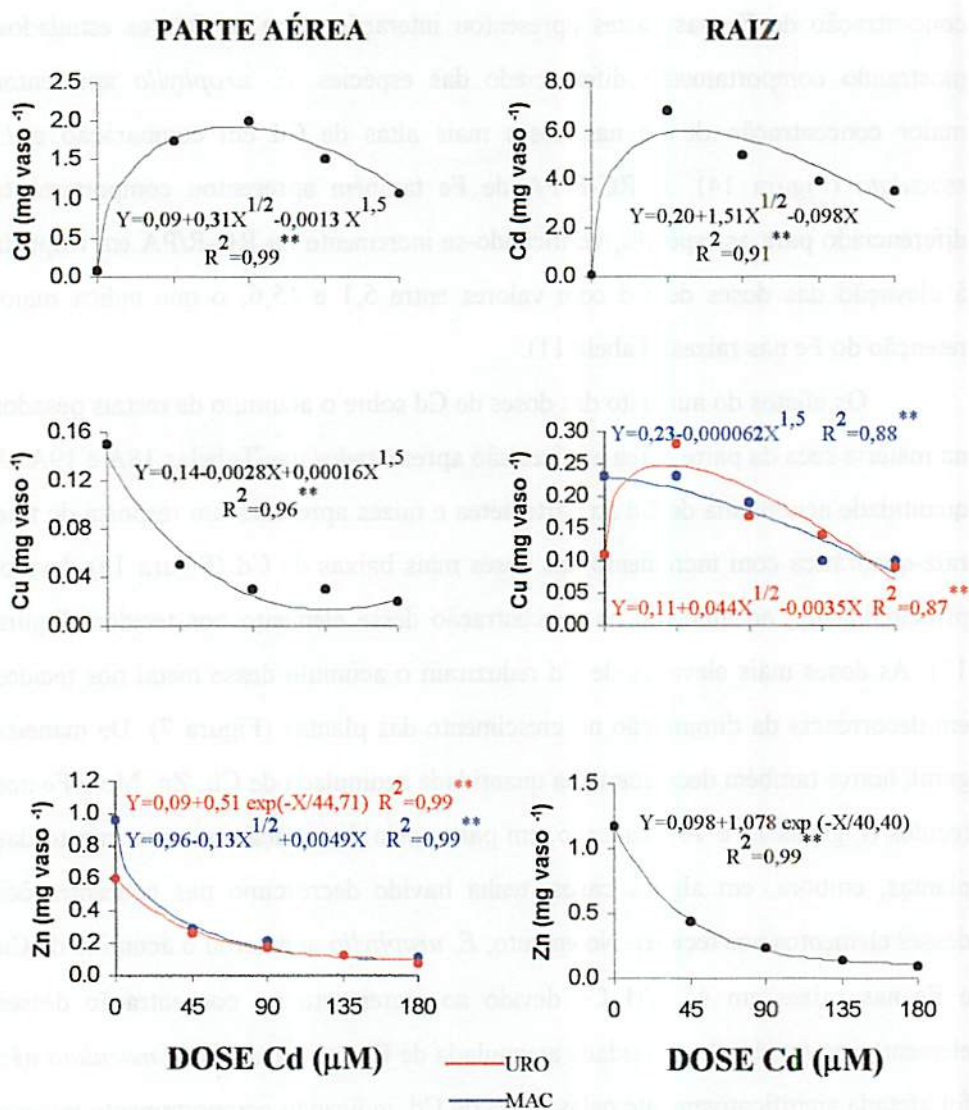


FIGURA 15. Acúmulo de Cd, Cu e Zn na parte aérea e raízes de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Cd em solução nutritiva. $**p \leq 0,01$

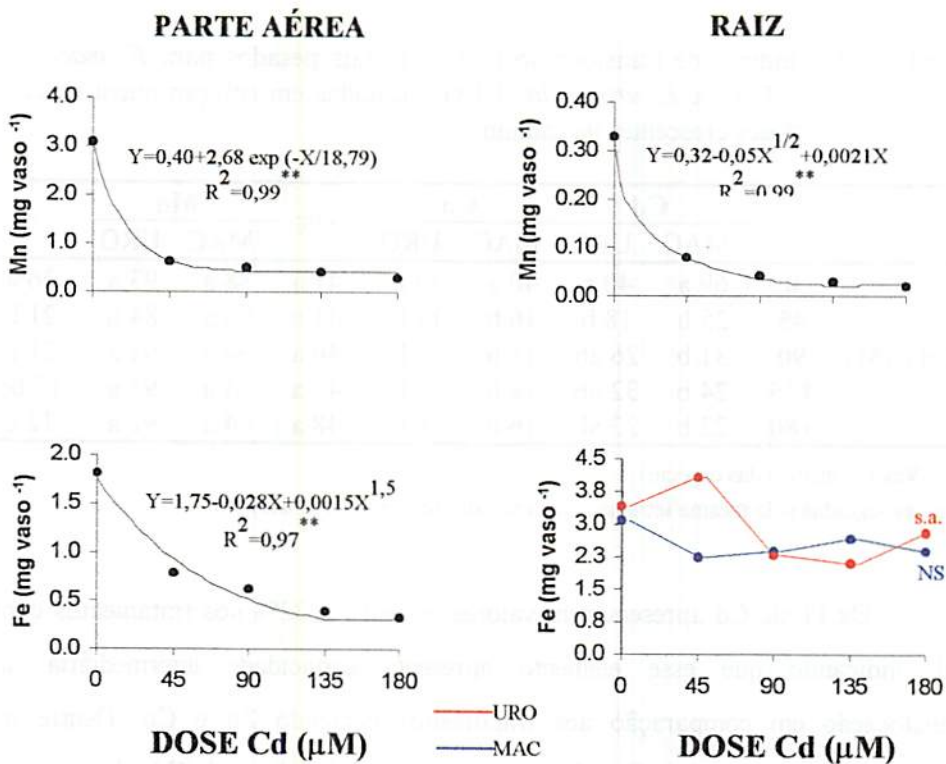


FIGURA 16. Acúmulo de Mn e Fe na parte aérea e raízes de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Cd em solução nutritiva. $**p \leq 0,01$; NS – não significativo; s.a. – sem ajuste polinomial

TABELA 12. Índices de translocação (%) de metais pesados para *E. maculata* (MAC) e *E. urophylla* (URO) crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de cádmio

	Cd		Cu		$Zn_{\bar{x}}$	Mn		$Fe_{\bar{x}}$	
	MAC	URO	MAC	URO		MAC	URO		
	0	69 a	40 a	40 a	59 a	41 a	88 a	93 a	36 a
	45	25 b	18 b	16 b	17 b	41 a	93 a	84 b	21 b
Cd (μ M)	90	31 b	26 ab	15 b	17 b	46 a	94 a	93 a	21 b
	135	24 b	32 ab	18 b	22 b	47 a	94 a	93 a	15 bc
	180	22 b	23 ab	16 b	16 b	48 a	94 a	92 a	12 c

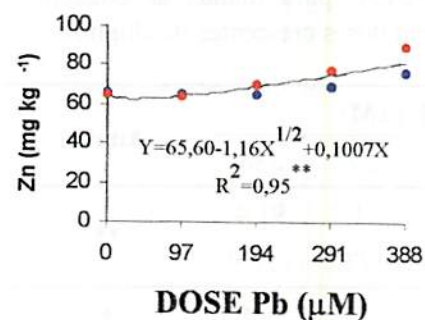
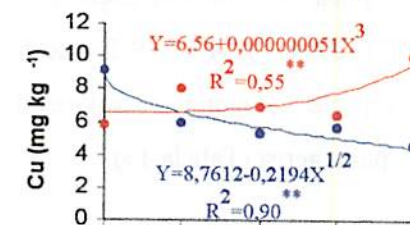
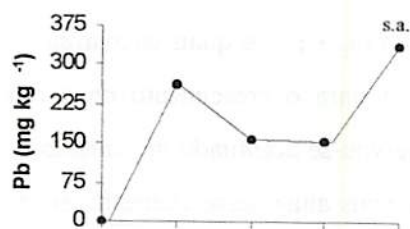
\bar{x} - Valores médios das espécies

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si (Tukey 5%)

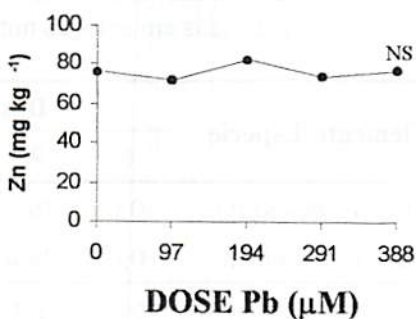
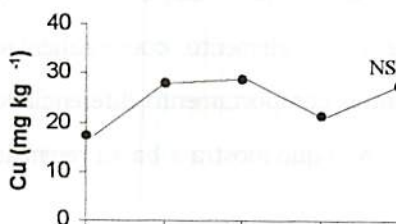
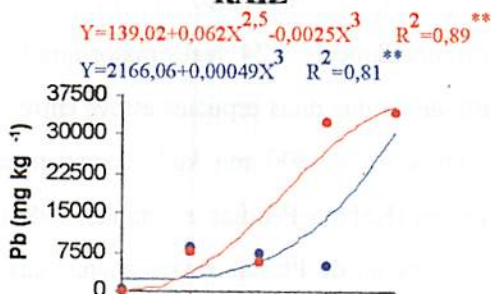
Os IT de Cd apresentaram valores entre 18 e 32% nos tratamentos com Cd, indicando que esse elemento apresenta capacidade intermediária de translocação em comparação aos tratamentos contendo Zn e Cu. Dentre os nutrientes, apenas os IT de Cu e Fe foram afetados pelas doses de Cd, observando-se decréscimo acentuado nos IT nas doses mais altas de Cd com comportamento diferenciado para espécie apenas para o IT de Cu.

O aumento das doses de Pb exerceu efeitos significativos sobre a concentração de metais pesados na matéria seca da parte aérea e raízes (Tabelas 11A e 12A). A concentração de Pb na parte aérea não apresentou ajuste para nenhum dos modelos polinomiais testados (Figura 17), observando-se descompasso com a produção de matéria seca (Figura 8). A falta de ajuste encontrado deve-se, provavelmente, à grande influência de agentes quelantes (EDTA) presentes na solução, que interferem na disponibilidade de Pb para as plantas (Fodor et al., 1998). Segundo esses autores, os agentes quelantes são liberados após a absorção de Fe pelas plantas e podem ligar-se ao Pb modificando sua disponibilidade. Este comportamento não foi verificado para os demais metais estudados presentes na

PARTE AÉREA



RAIZ



— URO
— MAC

FIGURA 17. Concentração de Pb, Cu e Zn na matéria seca da parte aérea e raiz de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Pb em solução nutritiva. ** $p \leq 0,01$; NS – não significativo

solução. O nível crítico de toxidez (NCT) de Pb em *E. urophylla* foi aproximadamente 1,24 vezes maior que *E. maculata* (Tabela 6). O NCT de Pb na parte aérea das duas espécies esteve entre 84 e 105 mg kg⁻¹, os quais encontram-se na faixa de 30-300 mg kg⁻¹, considerada tóxica para o crescimento de várias espécies (Kabata-Pendias e Pendias, 1985). Observou-se acentuado incremento na concentração de Pb nas raízes apenas nas doses mais altas desse elemento, sendo *E. urophylla* o que apresentou maiores concentrações. A maior capacidade de retenção de Pb nas raízes em *E. urophylla* pode explicar a maior tolerância dessa espécie a esse elemento, como salientado na DCT (Tabela 5). A RC-R/PA de Pb apresentou comportamento diferenciado para as espécies, atingindo-se valores de até 227,8, o que mostra a baixa retenção de Pb na parte aérea (Tabela 13).

TABELA 13. Razão das concentrações de metais pesados entre a matéria seca das raízes e parte aérea (RC-R/PA) para mudas de eucalipto crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de chumbo

Elemento/Espécie	Doses de Pb (µM)					Anava
	0	97	194	291	388	
Pb - <i>E. maculata</i>	0,0	36,3	47,3	31,2	91,4	**
Pb - <i>E. urophylla</i>	0,0	29,0	42,5	227,8	120,9	
$Cu_{\bar{x}}$	2,4	4,7	5,2	3,6	4,2	*
$Zn_{\bar{x}}$	1,2	1,1	1,2	1,0	0,9	NS
$Mn_{\bar{x}}$	0,2	0,4	0,2	0,1	0,1	**
Fe - <i>E. maculata</i>	8,8	10,1	10,6	8,2	19,9	*
Fe - <i>E. urophylla</i>	15,5	9,6	16,9	33,8	42,3	

\bar{x} - Valores médios das espécies

A concentração de Cu na parte aérea apresentou comportamento distinto entre as espécies (Figura 17). A dose 388 μM aumentou em 45% a concentração de Cu na parte aérea de *E. urophylla*, enquanto em *E. maculata* houve redução de 49% em relação ao controle. Ao contrário da parte aérea, a concentração de Cu nas raízes não foi influenciada pelas doses de Pb em solução. A RC-R/PA de Cu não variou de modo consistente com as doses de Pb, sendo a dose de 194 μM responsável pela maior retenção de Cu nas raízes (Tabela 13). Em ambas espécies, a concentração de Zn na parte aérea foi pouco influenciada pelas doses de Pb, verificando-se pequeno acréscimo de 25% na dose 388 μM (Figura 17). A concentração de Zn na matéria seca das raízes não foi influenciada pelas doses de Pb sem comportamento diferenciado para espécie. Essa baixa influência do Pb sobre a nutrição de Zn nas espécies de eucalipto também pode ser observada na RC-R/PA de Zn, a qual não foi afetada significativamente pelo aumento das doses de Pb (Tabela 13).

Resposta do tipo raiz-quadrática foi observada para a concentração de Mn na parte aérea, com decréscimo de 44% na dose 97 μM Pb e posterior elevação nas doses mais altas de Pb (Figura 18), com *E. urophylla* apresentando concentração média de 106,2 mg kg^{-1} , significativamente superior aos 72,9 mg kg^{-1} de *E. maculata*. Assim como observado para Zn, a concentração de Mn nas raízes não foi influenciada pelas doses de Pb. A dose de 97 μM aumentou a RC-R/PA de Mn reafirmando o decréscimo da concentração desse nutriente na parte aérea (Tabela 13). A concentração de Fe na parte aérea foi pouco influenciada pelas doses de Pb, ocorrendo pequeno decréscimo em 97 μM Pb e posterior acréscimo nas doses mais altas desse metal. Nas raízes de *E. maculata*, a concentração de Fe não foi afetada significativamente pelas doses de Pb, enquanto em *E. urophylla* a dose 388 μM Pb aumentou em até 407% em relação ao controle (Figura 18). As doses mais altas de

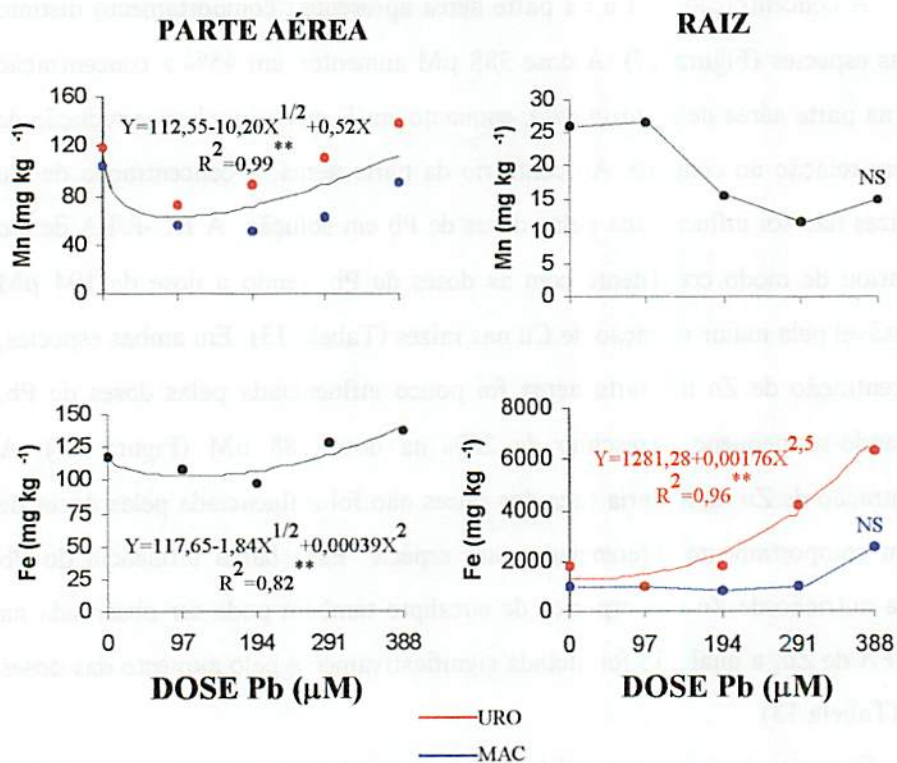


FIGURA 18. Concentração de Mn e Fe na matéria seca da parte aérea e raiz de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Pb em solução nutritiva. $**p \leq 0,01$; s.a. – sem ajuste; NS – não significativo

Pb aumentaram a RC-R/PA de Fe em ambas espécies, indicando que esse nutriente ficou mais retido nas raízes, reduzindo, assim, a translocação para a parte aérea (Tabela 13).

O efeito das doses de Pb sobre o acúmulo de metais pesados na matéria seca da parte aérea e raízes das espécies encontra-se nas Tabelas 20A e 21A. A quantidade acumulada de Pb na parte aérea foi diferenciada para as espécies, não se obtendo ajuste polinomial com maior conteúdo na dose 97 μM Pb. A quantidade acumulada de Pb nas raízes não variou de modo consistente com o aumento das doses desse metal em solução, não se obtendo ajuste polinomial para ambas espécies (Figura 19). De maneira geral, o acúmulo de Cu, Zn, Mn e Fe na parte aérea e raízes reduziu com o aumento das doses de Pb (Figuras 19 e 20), causado, em parte, pela diminuição do crescimento das plantas (Figura 8), embora, em alguns casos, tenha havido decréscimo das concentração desses metais nos tecidos (Figuras 17 e 18).

O aumento das doses de Pb também exerceu efeitos significativos sobre os índices de translocação (IT) de metais pesados (Tabela 25A) Os IT de Pb não variaram de modo consistente com as doses de Pb, observando-se comportamento diferenciado para as espécies (Tabela 14). Houve maior translocação de Pb em *E. maculata* do que *E. urophylla* nas doses mais altas de Pb. Metzger, et al. (1992) e Varennes et al. (1996) afirmam que uma das estratégias de defesa das plantas à toxidez de Pb é a restrição do transporte desse elemento para parte aérea, imobilizando-o nas raízes, onde é ligado a polímeros orgânicos insolúveis. Dessa forma, percebe-se que a maior tolerância apresentada por *E. urophylla* a Pb (Tabela 5) pode ser atribuída, em parte, à maior capacidade dessa espécie em restringir a translocação do Pb, uma vez que a tolerância é manifestada através de uma série de características fisiológicas (Ye et al., 1997). Os tratamentos contendo Pb na solução apresentaram IT máximo de 12%, indicando baixíssima

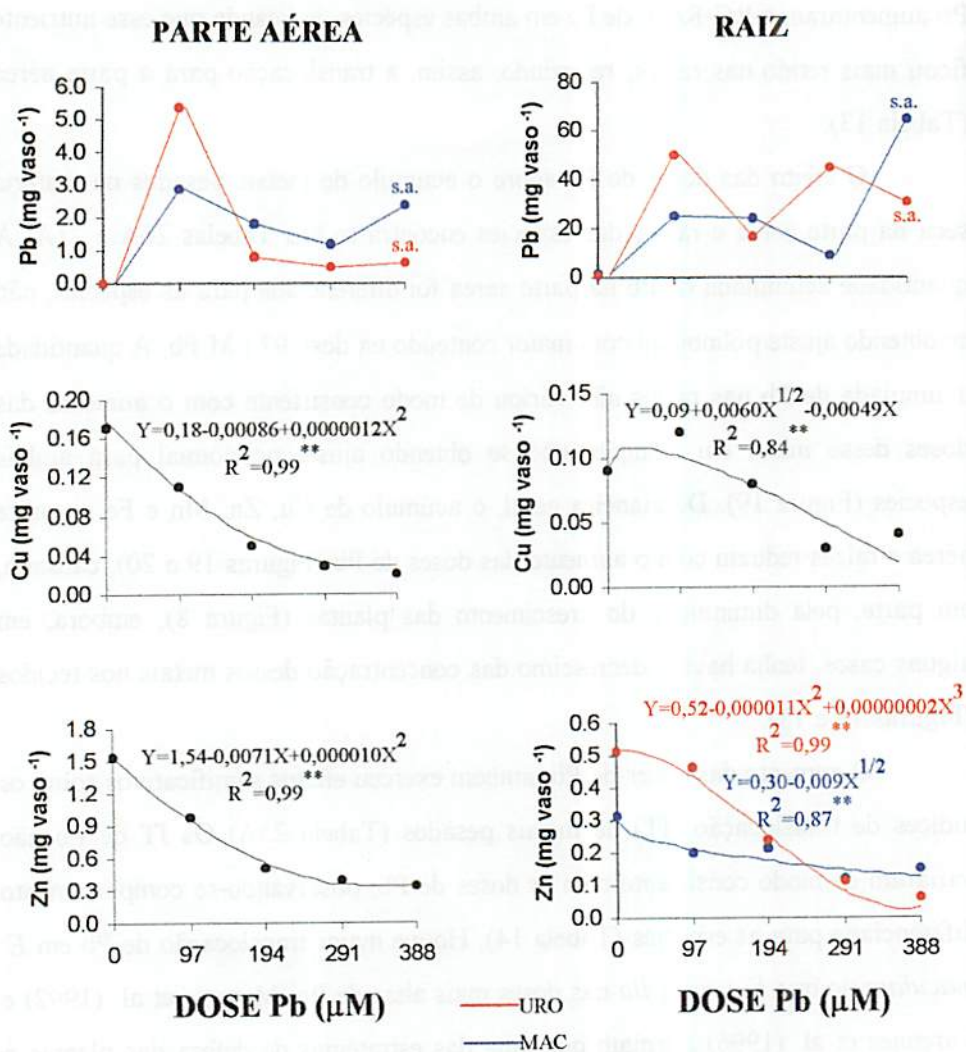


FIGURA 19. Acúmulo de Pb, Cu e Zn na parte aérea e raízes de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Pb em solução nutritiva. $**p \leq 0,01$; s.a. – sem ajuste polinomial

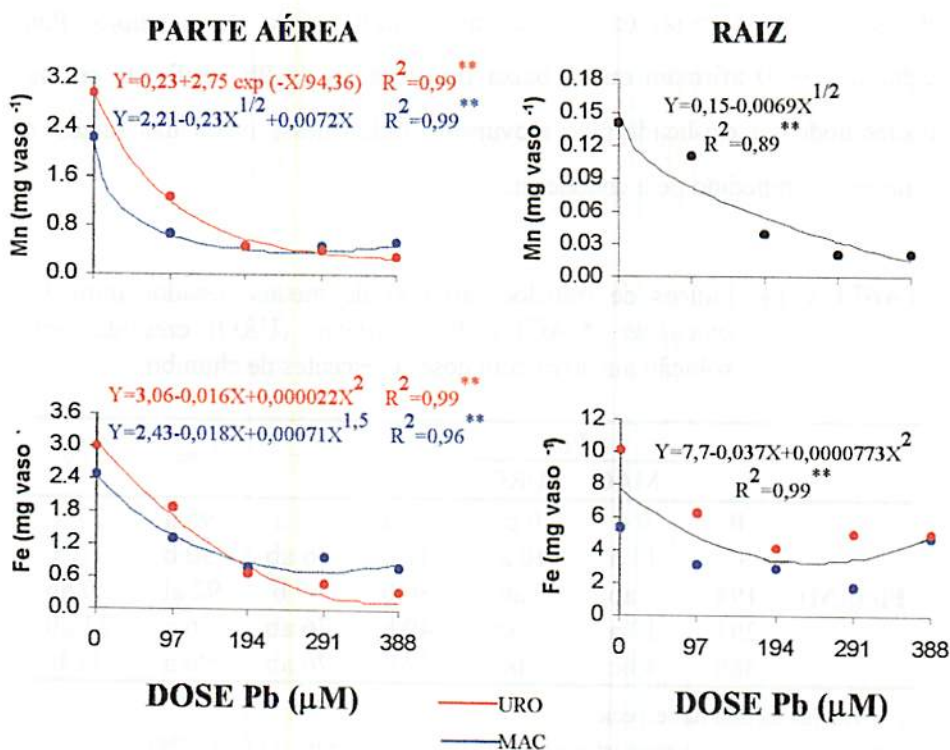


FIGURA 20. Acúmulo de Mn e Fe na parte aérea e raízes de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Pb em solução nutritiva. $**p \leq 0,01$

translocação desse metal das raízes para a parte aérea no eucalipto. Punz e Sieghardt (1993) afirmam que a baixa translocação de Pb verificada em várias espécies pode ser explicada pelo movimento radial desse metal nas raízes, onde usualmente é impedido pela endoderme.

TABELA 14. Índices de translocação (%) de metais pesados para *E. maculata* (MAC) e *E. urophylla* (URO) crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de chumbo

	Pb		$Cu_{\bar{x}}$	$Zn_{\bar{x}}$	$Mn_{\bar{x}}$	$Fe_{\bar{x}}$
	MAC	URO				
	0	0 c	65 a	78 a	95 a	27 a
	97	11 a	47 b	76 ab	90 b	30 a
Pb (μM)	194	8 ab	36 b	69 b	92 ab	20 ab
	291	12 a	49 b	76 ab	96 a	21 ab
	388	4 bc	42 b	76 ab	96 a	11 b

\bar{x} - Valores médios das espécies

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si (Tukey 5%)

Assim como observado para os tratamentos contendo Cd em solução, os IT de Zn e Mn foram pouco influenciados pelas doses de Pb (Tabela 14). O IT de Cu reduziu de 65% na dose 0 μM para até 36% em 194 μM Pb, sem comportamento diferenciado entre as espécies. Também verificou-se decréscimo no IT de Fe, atingindo-se IT mínimo de 11% na dose mais elevada de Pb (388 μM). O decréscimo no IT de Fe não foi tão evidente quanto o observado para os demais metais pesados estudados, indicando menor interferência do Pb na translocação de Fe no eucalipto.

4. 4. Fator de Transferência e Potencial de Acumulação de Metais Pesados

A determinação da capacidade de transferência de metais pesados da solução para a planta é de fundamental importância para a obtenção de sucesso em programas de fitorremediação. Os valores para o fator de transferência (Tabela 15), indicam o quanto a concentração de metal nos tecidos varia para cada unidade de concentração do metal em solução. Os valores calculados foram distintos para a espécie, metal e parte da planta considerada. Zn e Cd apresentaram maiores valores para fator de transferência (FT), indicando que as espécies de eucalipto possuem maior capacidade de imobilização desses elementos no tecido. No entanto, Cu e Pb apresentaram menor FT para a parte aérea, devido ao fato desses elementos ficarem associados com a parede celular dentro das raízes, tornando-se altamente imóveis (Kabata-Pendias e Pendias, 1985). *E. urophylla* apresentou FT de Zn para a parte aérea 1,8 vezes maior que *E. maculata*, mostrando que a primeira é capaz de concentrar mais Zn no tecido para cada unidade em solução. Logo, *E. urophylla* é de grande interesse para a remediação de solos contaminados com Zn por apresentar maior capacidade de concentração e imobilização desse elemento na parte aérea, promovendo a retirada do solo e reduzindo o tempo de ciclagem no ecossistema. No caso do Cu, tem-se comportamento inverso das espécies, ou seja, *E. maculata* apresenta FT para parte aérea 1,4 vezes maior que *E. urophylla*. Isto evidencia o comportamento distinto das espécies em relação a cada metal, o que certamente complica a interpretação sobre a resposta destas espécies em solos multi-contaminados por metais pesados. Para as raízes, observa-se que todos os metais em solução apresentaram maior FT do que na parte aérea, isto porque as raízes são as primeiras partes da planta a entrarem em contato com os elementos tóxicos (Tabela 15).

TABELA 15. Fator de transferência de Zn, Cu, Cd e Pb da solução para a parte aérea e raízes de *E. maculata* e *E. urophylla* na dose para redução de 25% da matéria seca

Metal Pesado/Espécie	Parte Aérea	Raízes
Zn – <i>E. maculata</i>	42,5	375,5
Zn – <i>E. urophylla</i>	74,5	379,5
Cu – <i>E. maculata</i>	21,7	51,3
Cu – <i>E. urophylla</i>	15,5	454,0
Cd – <i>E. maculata</i>	38,3	321,8
Cd – <i>E. urophylla</i>	38,7	361,0
Pb – <i>E. maculata</i>	13,2	247,8
Pb – <i>E. urophylla</i>	13,2	274,9

O potencial de acumulação dos metais pesados é outro parâmetro indicativo da capacidade de absorção da espécie. Os valores para o potencial de acumulação (Tabelas 16 e 17) indicam o quanto a concentração máxima dos metais nos tecidos é superior à concentração desses elementos na dose 0 μM . Os valores para o potencial de acumulação dos metais pesados na parte aérea das espécies de eucalipto encontram-se na Tabela 16. Comportamento diferenciado para as espécies foi observado apenas para Zn, onde *E. urophylla* apresentou PAC_{PA} 1,8 vezes maior que *E. maculata*. Essa resposta pode explicar a alta sensibilidade de *E. urophylla* a altas doses de Zn em solução (Tabela 5), ou seja, essa espécie apresenta baixa restrição na absorção de Zn, sofrendo maior efeito adverso do excesso desse metal. A PAC_{PA} de Pb não apresentou comportamento diferenciado entre as espécies com valor de 3370, mostrando o elevado potencial

de acumulação de Pb na parte aérea. Esse resultado está conflitante com os valores de índice de translocação (Tabela 14), os quais são baixos, mas deve-se ao fato da concentração de Pb na parte aérea na dose 0 μM Pb ser muito baixa, uma vez que a solução não continha Pb. Isso resultou valores de PAC_{PA} elevados, devendo-se, portanto, interpretá-los com cautela.

TABELA 16. Potencial de acumulação de Zn, Cu, Cd e Pb na parte aérea (PAC_{PA}) de *E. maculata* (MAC) e *E. urophylla* (URO) crescidas em solução nutritiva

Metal Pesado/Espécie	Conc. máxima mg kg^{-1}	Conc. Dose 0 μM	PAC_{PA}
Zn – MAC	1034	84,5	12,2
Zn – URO	1194	54,7	21,8
Cu \bar{x}	536	12,0	44,7
Cd \bar{x}	380	4,3	88,4
Pb \bar{x}	337	0,1	3370

\bar{x} - Valores médios das espécies

Os valores para o potencial de acumulação dos metais pesados nas raízes (PAC_{R}) encontram-se na Tabela 17. Observa-se que Cu e Pb apresentaram comportamento diferenciado entre as espécies, sendo *E. maculata* com maior PAC_{R} para Cu e *E. urophylla*, para Pb. Os valores obtidos mostram a importância das raízes na imobilização de Cu e Pb. O PAC_{R} de Cd apresentou menores valores em comparação ao PAC_{PA} , indicando que a parte aérea das espécies possui grande importância na imobilização de Cd.

TABELA 17. Potencial de acumulação de Zn, Cu, Cd e Pb nas raízes (PAC_R) de *E. maculata* (MAC) e *E. urophylla* (URO) crescidas em solução nutritiva

Metal Pesado/Espécie	Conc. Máxima	Conc. Dose 0 μM	PAC_R
	mg kg ⁻¹		
Zn \bar{x}	6740	334	20,2
Cu – MAC	6251	20	312,6
Cu – URO	13650	81	168,5
Cd \bar{x}	4860	262,3	18,5
Pb – MAC	30788	2166	14,2
Pb – URO	35622	139	256,3

\bar{x} - Valores médios das espécies

4. 5. P, K, S, Ca e Mg na Parte Aérea e Raízes: Concentração e Acúmulo

O aumento das doses de Zn exerceu efeitos significativos sobre a concentração de P, K, S, Ca e Mg na matéria seca da parte aérea e raízes (Tabelas 5A e 6A). Houve aumento na concentração de P na parte aérea, atingindo-se o máximo de 3,0 g kg⁻¹ na dose 820 μM Zn, o que corresponde a um aumento de 82% em relação ao tratamento sem Zn adicional (Figura 21). Nas raízes, ocorreu comportamento diferenciado entre as espécies com *E. maculata*, apresentando resposta do tipo raiz-quadrática, verificando-se elevação na concentração de P nas doses mais baixas de Zn e posterior decréscimo em 1200 μM Zn. A razão das concentrações de P entre as raízes e parte aérea (RC-R/PA) não foi afetada significativamente pelas doses de Zn, obtendo-se valores acima de um, o que indica maior retenção do P nas raízes (Tabela 18). Para K, não houve efeito das doses de Zn na matéria seca da parte aérea, enquanto nas raízes de *E. maculata* houve decréscimo de até 84% e de 60% em *E. urophylla*, caracterizando o processo de inibição no processo de absorção (Figura 21). O decréscimo na concentração de K

PARTE AÉREA

RAIZ

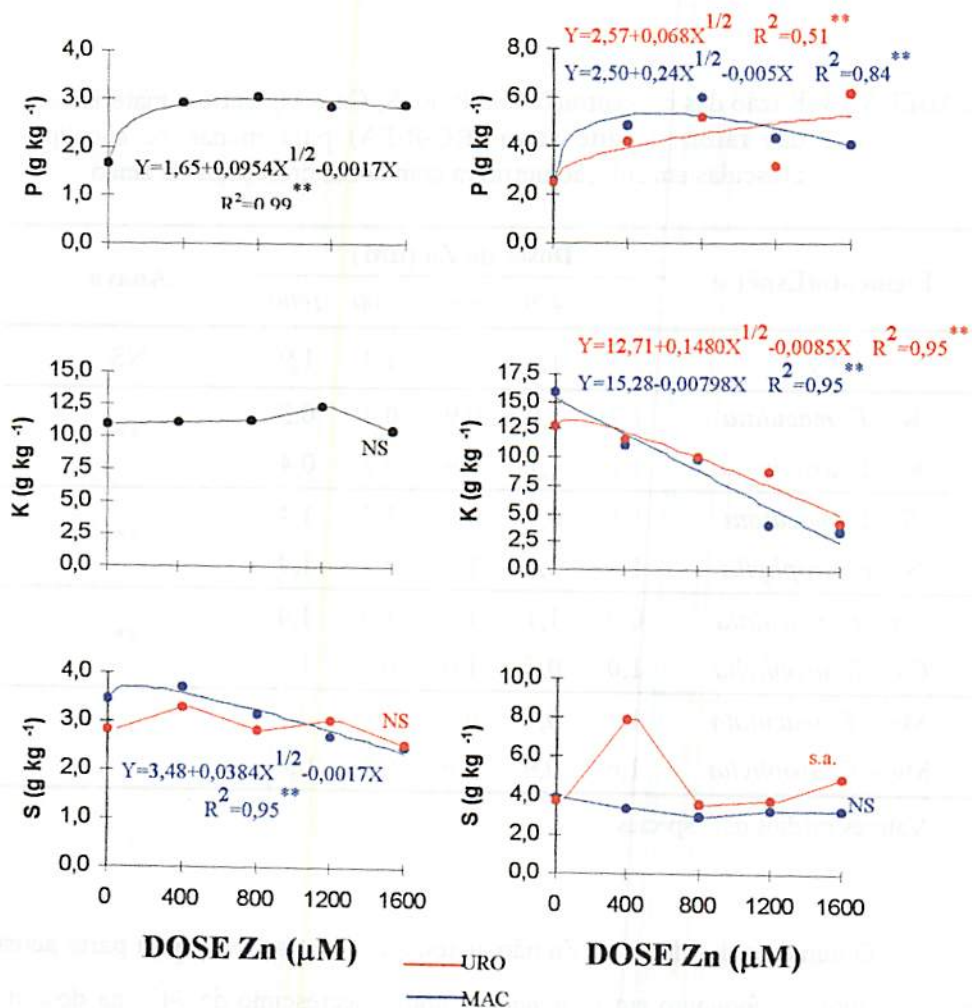


FIGURA 21. Concentração de P, K e S na matéria seca da parte aérea e raiz em mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Zn em solução nutritiva. ** $p \leq 0,01$; NS – não significativo; s.a. – sem ajuste

nas raízes contribuiu para reduzir a RC-R/PA em ambas espécies, obtendo-se valores abaixo de um nas doses superiores a 800 μM Zn (Tabela 18).

TABELA 18. Razão das concentrações de P, K, S, Ca e Mg entre a matéria seca das raízes e parte aérea (RC-R/PA) para mudas de eucalipto crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de zinco

Elemento/Espécie	Doses de Zn (μM)					Anava
	0	400	800	1200	1600	
$\bar{P}_{\bar{X}}$	2,5	1,6	1,9	1,4	1,9	NS
K - <i>E. maculata</i>	1,7	1,0	0,9	0,4	0,3	**
K - <i>E. urophylla</i>	1,1	1,1	0,9	0,7	0,4	
S - <i>E. maculata</i>	1,1	0,9	0,9	1,2	1,4	**
S - <i>E. urophylla</i>	1,3	2,4	1,3	1,2	1,9	
Ca - <i>E. maculata</i>	0,9	1,1	1,2	1,4	1,4	**
Ca - <i>E. urophylla</i>	1,0	0,7	1,0	0,7	1,3	
Mg - <i>E. maculata</i>	1,1	0,7	0,8	1,0	0,7	**
Mg - <i>E. urophylla</i>	1,6	0,9	0,9	0,6	0,8	

\bar{X} - Valores médios das espécies

O aumento das doses de Zn não afetou a concentração de S na parte aérea de *E. urophylla*, enquanto em *E. maculata* houve decréscimo de 34% na dose de 1600 μM Zn, que não chegou a atingir níveis de 0,9 g kg^{-1} considerados de deficiência de S para a espécie (Dell, Malajczuk e Grove, 1995). Ao contrário do observado para a parte aérea, não houve efeito significativo das doses de Zn sobre a concentração de S nas raízes de *E. maculata*, enquanto *E. urophylla* não apresentou ajuste polinomial para essa variável, sendo a dose de 400 μM Zn responsável pela maior concentração de S no tecido (Figura 21). Apesar de se

observar efeito significativo das doses de Zn sobre a RC-R/PA, não houve resposta definida das espécies para esse parâmetro, com valores variando de 0,9 a 2,4 nas diferentes doses de Zn (Tabela 18). Para o Ca, não se verificou comportamento diferenciado entre as espécies para a concentração na parte aérea, ocorrendo decréscimo de 38% na dose de 1600 μM Zn, obtendo-se concentração mínima de 3,0 g kg^{-1} de Ca, que está abaixo da faixa adequada de 3,1–4,3 g kg^{-1} para o crescimento de *E. urophylla* (Dell, Malajczuk e Grove, 1995). Resposta quadrática foi obtida para a concentração de Ca nas raízes de *E. urophylla*, observando-se decréscimo nas doses intermediárias de Zn e posterior incremento nas doses acima de 1200 μM Zn. A concentração de Ca nas raízes de *E. maculata* não foi afetada significativamente pelas doses de Zn em solução (Figura 22). Brown et al. (1995) também observaram redução na concentração de Ca nas raízes de *Thlaspi caerulescens*, principalmente nos tratamentos contendo 3160 μM Zn. A RC-R/PA de Ca obteve pequeno acréscimo em seus valores na dose de 1600 μM Zn, mostrando retenção preferencial nas raízes (Tabela 18).

A concentração de Mg nos tecidos também foi influenciada pelo aumento das doses de Zn em solução. Não houve diferença entre *E. maculata* e *E. urophylla* na concentração de Mg na parte aérea, havendo redução de 52% na dose de 1600 μM Zn, que permitiu atingir concentração mínima de 2,3 g kg^{-1} . Nas raízes, também houve decréscimo na concentração de Mg, sendo *E. urophylla* o que apresentou maior decréscimo na dose de 400 μM Zn, que caracteriza a alta competitividade entre o Zn e Mg e que explica a redução na concentração de Mg na parte aérea (Figura 22), mostrando que houve participação de deficiência induzida de Mg nos sintomas de toxidez de Zn como resultado da similaridade do raio iônico entre Zn^{2+} e Mg^{2+} (Marschner, 1995). A RC-R/PA de Mg para ambas espécies sofreu decréscimo com o aumento das doses de Zn, obtendo-se valores

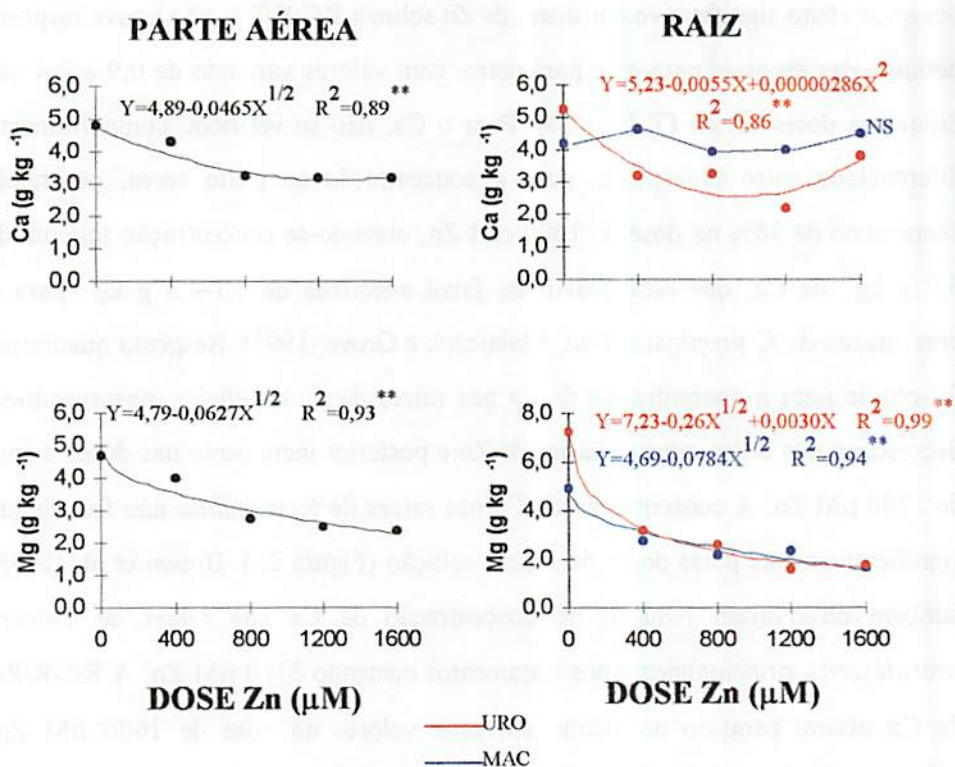


FIGURA 22. Concentração de Ca e Mg na matéria seca da parte aérea e raiz em mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Zn em solução nutritiva. **p ≤ 0,01; NS – não significativo

abaixo de um, o que indica maior retenção na matéria seca da parte aérea (Tabela 18).

O acúmulo dos macronutrientes também foi influenciado pelas doses de Zn (Tabelas 14A e 15A). De modo geral, houve decréscimo na quantidade acumulada de todos os macronutrientes (Figuras 23 e 24), causado, em parte, pela redução no crescimento das plantas (Figura 5), embora, em alguns casos, tenha havido decréscimo da concentração de K, S, Ca e Mg nos tecidos.

O aumento das doses de Zn exerceu efeitos significativos sobre os índices de translocação (IT) de P, K, S, Ca e Mg das espécies de eucalipto (Tabela 22A). Observa-se que houve incremento dos IT de todos os macronutrientes em função do aumento das doses de Zn com comportamento diferenciado apenas para K e S (Tabela 19). O incremento na translocação de S em resposta às doses de Zn pode estar relacionado com mecanismos de tolerância das plantas a esse elemento, que seriam a produção de compostos intercelulares ricos em cisteína, chamados fitoquelatinas (Fontes, 1992; Meharg, 1994; Keltjens e Van Beusichem, 1998). Grill et al. (1987) afirmam que Zn^{2+} é um íon ativo a induzir a síntese desses compostos ricos em S e que estes têm a característica de complexar Zn nas plantas.

TABELA 19. Índices de translocação (%) de P, K, S Ca e Mg para *E. maculata* (MAC) e *E. urophylla* (URO) crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de zinco

	$P_{\bar{x}}$	K		S		$Ca_{\bar{x}}$	$Mg_{\bar{x}}$	
		MAC	URO	MAC	URO			
	0	60 b	60 d	73 c	69 b	68 b	73 c	67 c
	400	74 a	82 c	80 bc	84 a	64 b	83 b	85 b
Zn (μ M)	800	77 a	87 bc	87 ab	87 a	83 a	85 ab	88 ab
	1200	85 a	97 a	89 a	90 a	82 a	89 a	91 a
	1600	81 a	96 ab	94 a	86 a	79 a	85 ab	92 a

^x - Valores médios das espécies

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si (Tukey 5%)

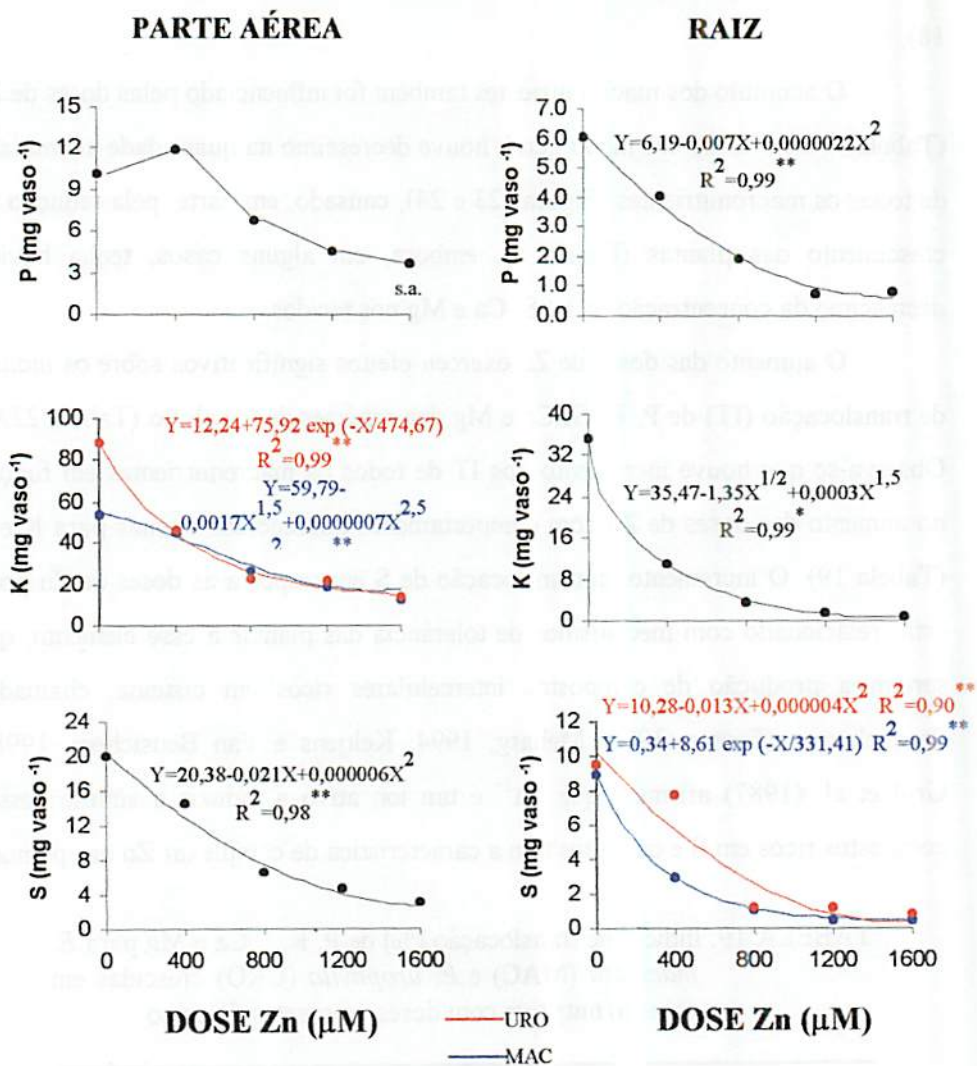
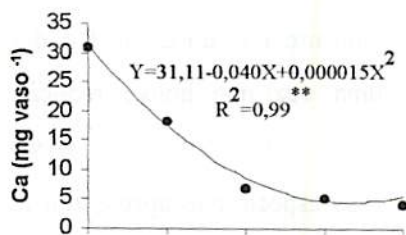
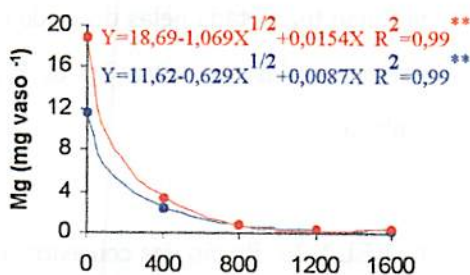
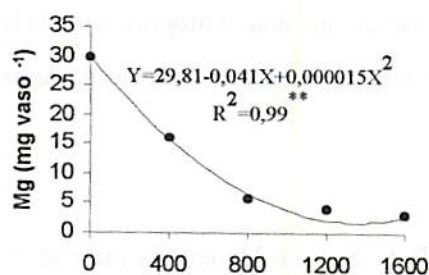
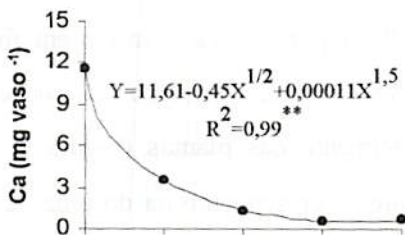


FIGURA 23. Acúmulo de P, K e S na parte aérea e raízes de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Zn em solução nutritiva. ** $p \leq 0,01$; * $p \leq 0,05$; s.a. – sem ajuste

PARTE AÉREA



RAIZ



DOSE Zn (μ M)

— URO
— MAC

DOSE Zn (μ M)

FIGURA 24. Acúmulo de Ca e Mg na parte aérea e raízes de mudas de eucálio (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Zn em solução nutritiva. $**p \leq 0,01$

A influência das doses de Cu sobre a concentração de P, K, S, Ca e Mg nos tecidos encontra-se nas Tabelas 7A e 8A. Observou-se incremento dos teores de P na parte aérea e raízes em função do aumento das doses de Cu devido, provavelmente, ao efeito de concentração, uma vez que houve redução no crescimento das plantas (Figura 6). Em razão da capacidade de *E. urophylla* manter o crescimento na dose de 32 μM Cu, essa espécie não apresentou ajuste polinomial para a concentração de P nos tecidos, observando-se maior incremento dessas variáveis apenas nas doses acima de 32 μM Cu (Figura 25). A RC-R/PA de P não foi afetada pelas doses de Cu, indicando que houve proporcionalidade no incremento das concentrações de P entre a matéria seca das raízes e parte aérea (Tabela 20).

TABELA 20. Razão das concentrações de P, K, S, Ca e Mg entre a matéria seca das raízes e parte aérea (RC-R/PA) para mudas de eucalipto crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de cobre

Elemento/Espécie	Doses de Cu (μM)					ANAVA
	0	32	64	128	192	
$\text{P}_{\bar{x}}$	1,2	1,2	1,3	1,3	1,2	NS
$\text{K}_{\bar{x}}$	0,7	0,8	0,4	0,2	0,1	**
S - <i>E. maculata</i>	1,0	1,2	1,1	0,7	0,8	*
S - <i>E. urophylla</i>	1,2	1,0	0,7	0,6	0,5	
$\text{Ca}_{\bar{x}}$	0,9	1,0	1,0	0,6	0,6	**
Mg - <i>E. maculata</i>	1,5	0,6	0,6	0,3	0,3	**
Mg - <i>E. urophylla</i>	1,8	1,6	0,6	0,5	0,3	

\bar{x} - Valores médios das espécies

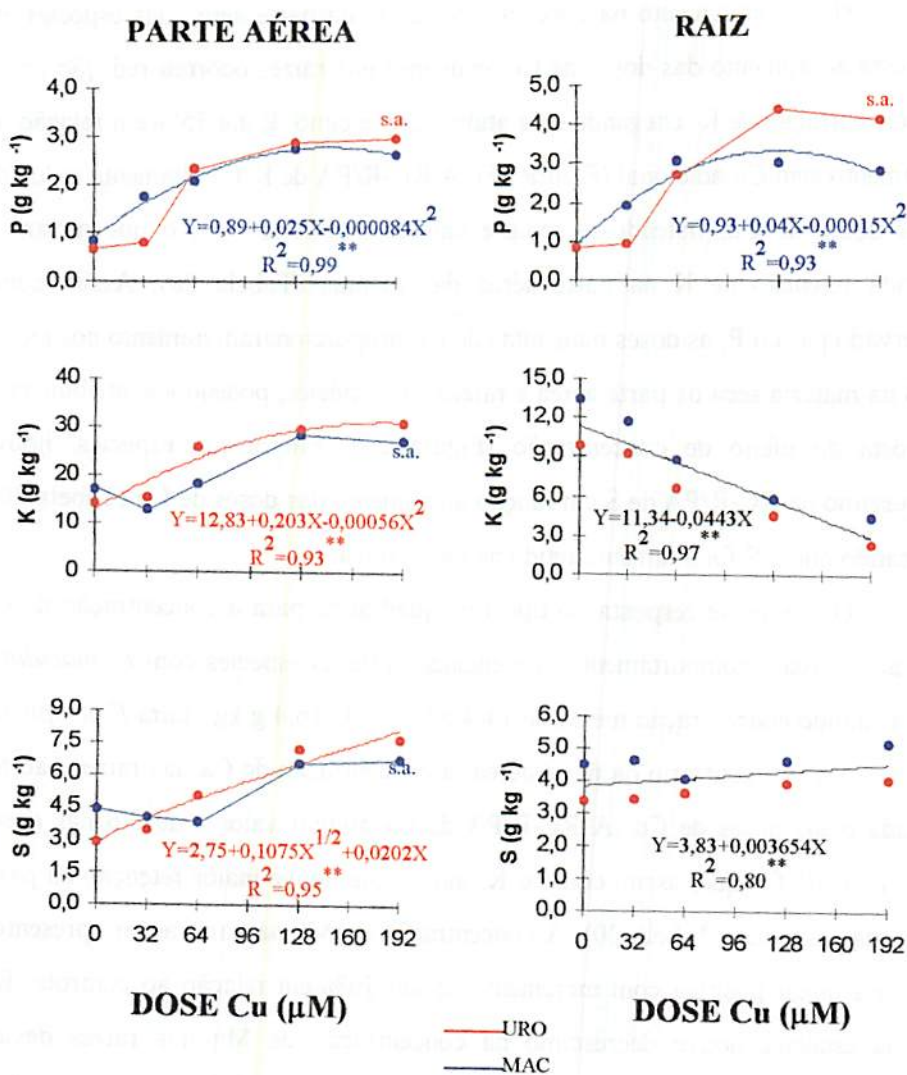


FIGURA 25. Concentração de P, K e S na matéria seca da parte aérea e raiz de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Cu em solução nutritiva. ** $p \leq 0,01$; s.a. – sem ajuste

Houve incremento na concentração de K na parte aérea das espécies em resposta ao aumento das doses de Cu, enquanto nas raízes ocorreu redução linear na concentração de K, chegando-se a atingir decréscimo de até 75% em relação ao tratamento sem Cu adicional (Figura 25). A RC-R/PA de K foi altamente reduzida pelas doses de Cu, obtendo-se sempre valores abaixo de um, o que mostra a elevada retenção de K na parte aérea das plantas (Tabela 20). Assim como observado para o P, as doses mais altas de Cu proporcionaram aumento nos teores de S na matéria seca da parte aérea e raízes das espécies, podendo-se atribuir essa resposta ao efeito de concentração (Figura 25). Em ambas espécies, houve decréscimo na RC-R/PA de S em função do aumento das doses de Cu (Tabela 20), indicando que o S foi altamente retido na parte aérea.

Observou-se resposta do tipo raiz-quadrática para a concentração de Ca na parte aérea e comportamento diferenciado entre as espécies com *E. maculata*, apresentando concentração média de $14,4 \text{ g kg}^{-1}$ e de $16,4 \text{ g kg}^{-1}$ para *E. urophylla* (Figura 26). Ao contrário da parte aérea, a concentração de Ca nas raízes não foi afetada pelas doses de Cu. A RC-R/PA de Ca atingiu valores de 0,6 nas doses mais altas de Cu que, assim como o K, indica que houve maior retenção na parte aérea das espécies (Tabela 20). A concentração de Mg na parte aérea apresentou resposta linear positiva com incremento de até 76% em relação ao controle. Em ambas espécies houve decréscimo na concentração de Mg nas raízes devido possivelmente, ao processo de inibição de absorção (Figura 26). A redução da RC-R/PA de Mg em *E. urophylla* foi maior nas doses mais altas de Cu, enquanto em *E. maculata* a RC-R/PA não variou de modo consistente com o aumento das doses de Cu (Tabela 20).

O efeito do aumento das doses de Cu sobre o acúmulo de P, K, S, Ca e Mg na matéria seca da parte aérea e raízes encontra-se nas Tabelas 16A e 17A. Apenas o acúmulo de P na parte aérea não apresentou comportamento diferenciado

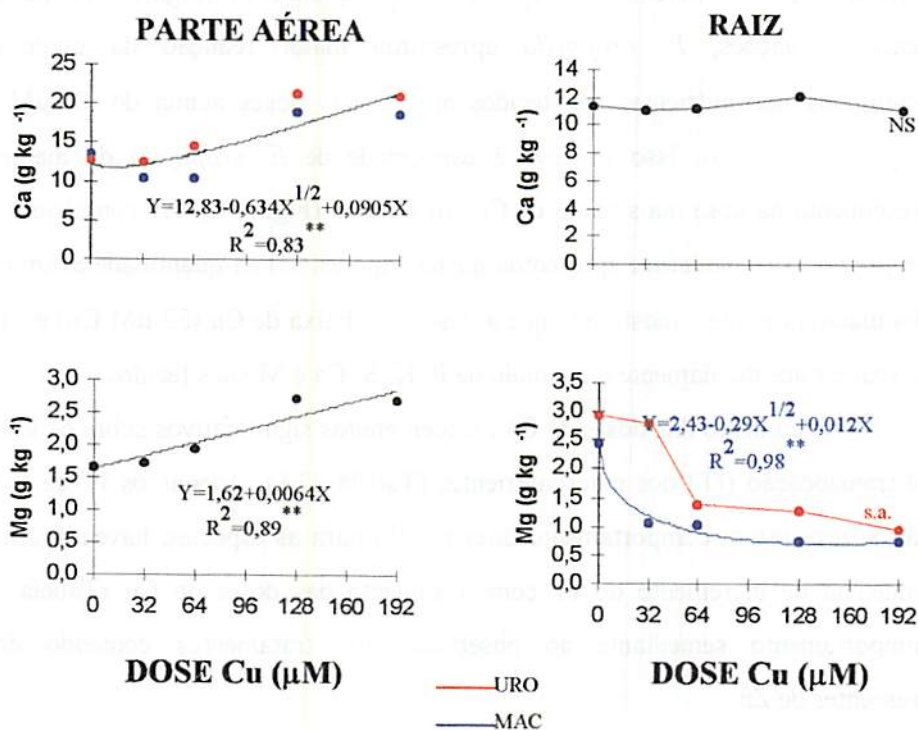


FIGURA 26. Concentração de Ca e Mg na matéria seca da parte aérea e raiz de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Cu em solução nutritiva. ** $p \leq 0,01$; NS – não significativo; s.a. – sem ajuste

entre as espécies, obtendo-se resposta do tipo quadrática (Figura 27). Para as demais situações, *E. urophylla* apresentou maior redução da quantidade acumulada dos nutrientes nos tecidos apenas nas doses acima de 32 μM Cu (Figuras 27 e 28). Isso se deve à capacidade de *E. urophylla* de manter o crescimento na dose mais baixa de Cu em solução (Figura 6). Ao contrário de *E. urophylla*, o *E. maculata* apresentou queda exponencial da quantidade acumulada dos macronutrientes, mostrando que a dose mais baixa de Cu (32 μM Cu) é capaz de reduzir acentuadamente o acúmulo de P, K, S, Ca e Mg nos tecidos.

O aumento das doses de Cu exerceu efeitos significativos sobre os índices de translocação (IT) dos macronutrientes (Tabela 23A). Apenas os IT de K e S não apresentaram comportamento diferenciado para as espécies, havendo sempre tendência de incremento do IT com o aumento das doses de Cu (Tabela 21), comportamento semelhante ao observado nos tratamentos contendo doses crescentes de Zn.

TABELA 21. Índices de translocação (%) de P, K, S, Ca e Mg para *E. maculata* (MAC) e *E. urophylla* (URO) crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de cobre

	P		$K_{\bar{x}}$	$S_{\bar{x}}$	Ca		Mg	
	MAC	URO			MAC	URO	MAC	URO
0	76 ab	71 ab	81 c	74 b	82 ab	75 bc	69 c	64 b
32	70 bc	65 b	76 c	69 b	73 b	70 c	79 bc	60 b
64	64 c	78 a	89 b	78 b	71 b	83 ab	81 b	86 a
128	80 a	77 a	96 ab	88 a	87 a	90 a	94 a	91 a
192	83 a	80 a	98 a	89 a	90 a	91 a	95 a	94 a

X - Valores médios das espécies

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si (Tukey 5%)

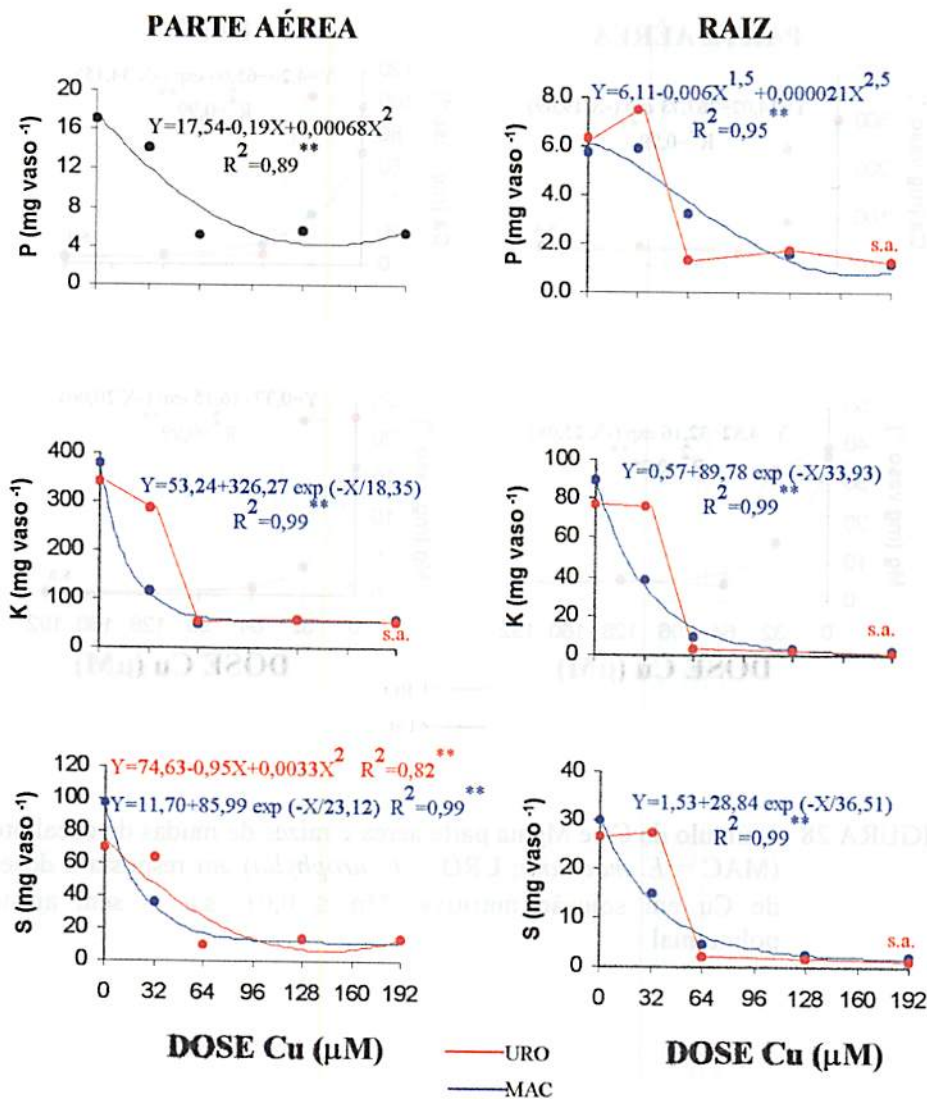


FIGURA 27. Acúmulo de P, K e S na parte aérea e raízes de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Cu em solução nutritiva. $**p \leq 0,01$; s.a. – sem ajuste polinomial

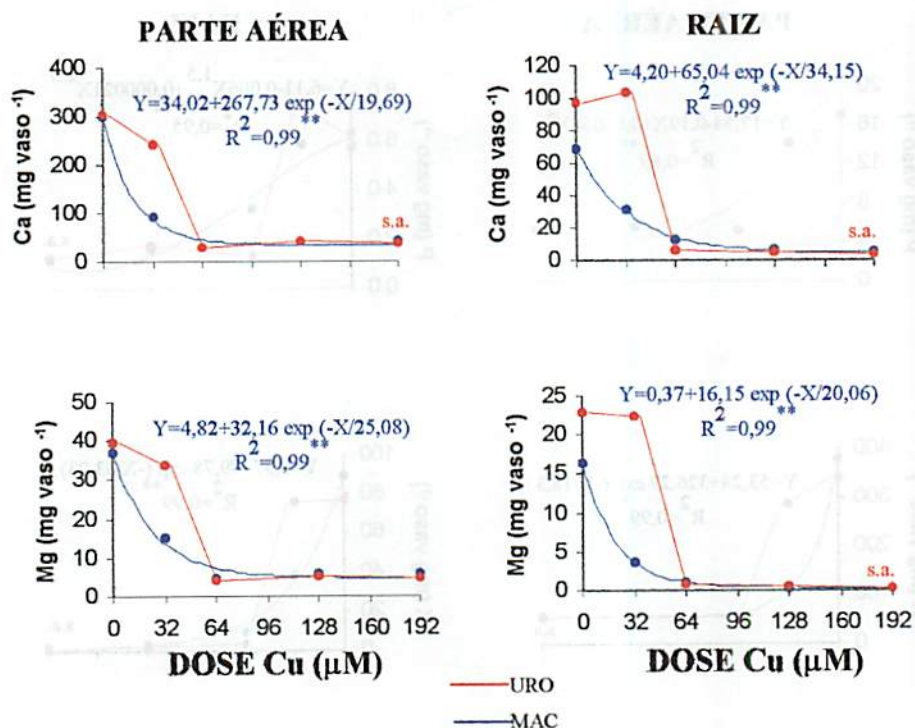


FIGURA 28. Acúmulo de Ca e Mg na parte aérea e raízes de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Cu em solução nutritiva. ** $p \leq 0,01$; s.a. – sem ajuste polinomial

O efeito do aumento das doses de Cd sobre a concentração de P, K, S, Ca e Mg na matéria seca da parte aérea e raízes encontram-se nas Tabelas 9A e 10A. Os teores de P na parte aérea e raízes das espécies sofreram acréscimo nos seus valores em função do aumento das doses de Cd (Figura 29) devido, possivelmente, ao efeito de concentração, uma vez que houve decréscimo na produção de matéria seca dos tecidos (Figura 7). Percebe-se que o aumento das concentrações de P foi proporcional entre a parte aérea e raízes, já que a RC-R/PA de P não foi afetada significativamente pelas doses de Cd (Tabela 22).

TABELA 22. Razão das concentrações de P, K, S, Ca e Mg entre a matéria seca das raízes e parte aérea (RC-R/PA) para mudas de eucalipto crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de cádmio

Elemento/Espécie	Doses de Cd (μM)					Anava
	0	45	90	135	180	
$P_{\bar{x}}$	1,0	1,3	1,2	1,4	1,4	NS
$K_{\bar{x}}$	0,9	0,8	0,9	0,6	0,5	**
$S_{\bar{x}}$	1,0	1,9	2,2	2,7	2,5	**
$Ca_{\bar{x}}$	0,7	0,9	0,9	1,2	1,3	**
$Mg_{\bar{x}}$	1,2	1,2	1,1	0,9	0,8	**

\bar{x} - Valores médios das espécies

A concentração de K na parte aérea não foi afetada pelo aumento das doses de Cd, enquanto nas raízes ocorreu decréscimo de até 55% na dose 180 μM Cd (Figura 29). Marques (1996) também encontrou redução na concentração de K nas raízes de espécies arbóreas nativas (*Anadenanthera peregrina*, *Cordia trichotoma* e *Peltophorum dubium*) sob solo multi-contaminado, sendo a inibição

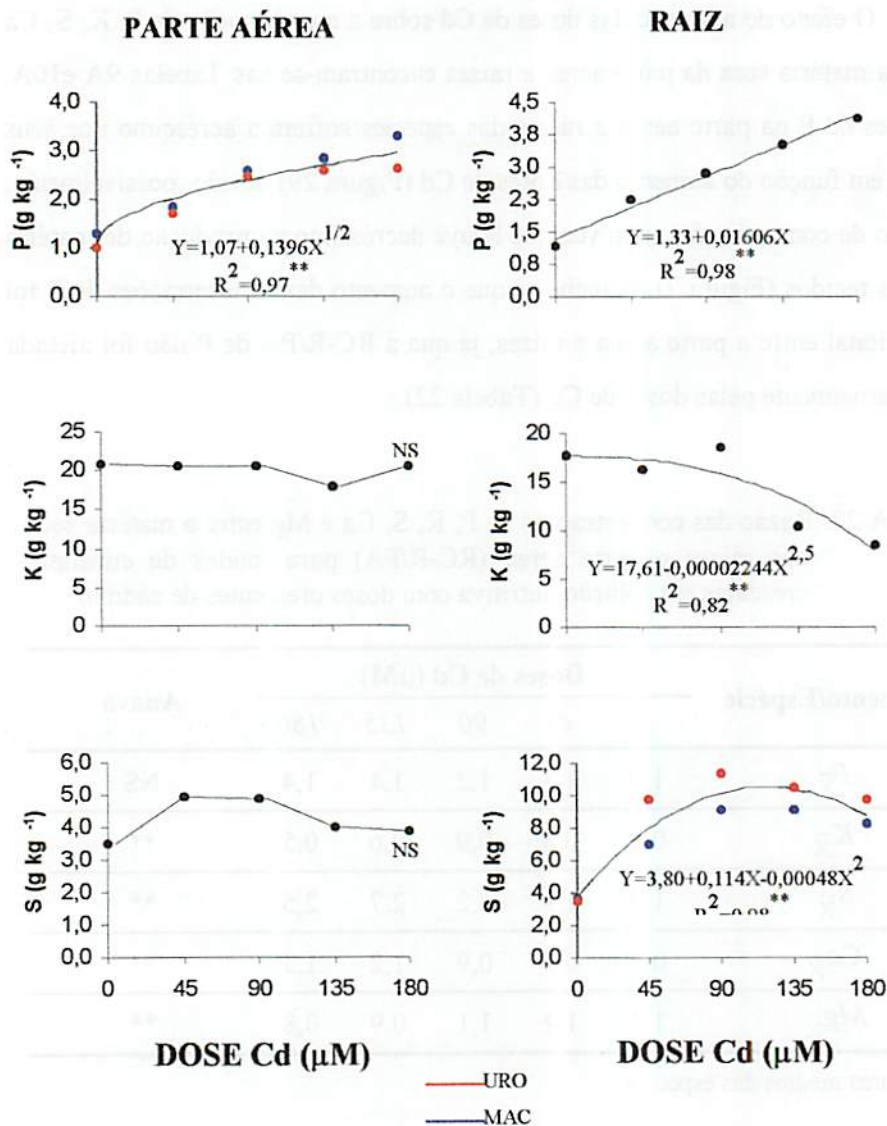


FIGURA 29. Concentração de P, K e S na matéria seca da parte aérea e raiz de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Cd em solução nutritiva. $**p \leq 0,01$; NS – não significativo

competitiva entre o K e os metais pesados presentes em altas concentrações, uma explicação plausível para a redução na absorção do K. A RC-R/PA de K também apresentou redução dos seus valores em resposta ao aumento das doses de Cd com valores abaixo de um, o que mostra maior retenção na parte aérea das plantas (Tabela 22). Observou-se que a concentração de S na parte aérea também não foi afetada pelas doses de Cd, enquanto na matéria seca das raízes verificou-se resposta quadrática com incremento na concentração de S nas doses mais baixas de Cd e posterior decréscimo nas doses de 135 e 180 μM (Figura 29). A RC-R/PA de S aumentou de 1,0 no controle para 2,5 (180 μM Cd), mostrando maior retenção nas raízes nas doses mais elevadas de Cd (Tabela 22).

Resposta quadrática foi obtida para a concentração de Ca na parte aérea das espécies, atingindo-se concentração mínima de 9,7 g kg^{-1} Ca na dose de 109 μM Cd. *E. urophylla* apresentou aumento acentuado na concentração de Ca nas raízes nas doses mais altas de Cd, enquanto *E. maculata* não se ajustou a nenhum dos modelos polinomiais estudados (Figura 30). A RC-R/PA de Ca aumentou de 0,7 (controle) para 1,3 (180 μM Cd), mostrando que o Cd aumenta a retenção do Ca nas raízes (Tabela 22). Para Mg na matéria seca da parte aérea, houve resposta do tipo raiz-quadrática, sendo a dose de 45 μM Cd capaz de reduzir a concentração em até 1,5 g kg^{-1} (Figura 30), abaixo da faixa de 2,1-2,3 g kg^{-1} adequada para o crescimento de *E. urophylla* (Dell, Malajczuk e Grove, 1995). A dose 180 μM Cd reduziu em até 39% a concentração de Mg nas raízes, podendo-se atribuir essa resposta à inibição do processo de absorção. Não foi observado comportamento diferenciado entre as espécies para a RC-R/PA de Mg, sendo o aumento das doses de Cd responsável pelo decréscimo dos valores desse parâmetro (Tabela 22).

O acúmulo de P, K, S, Ca e Mg na matéria seca da parte aérea e raízes das espécies foi afetado pelas doses de Cd em solução nutritiva (Tabelas 18A e

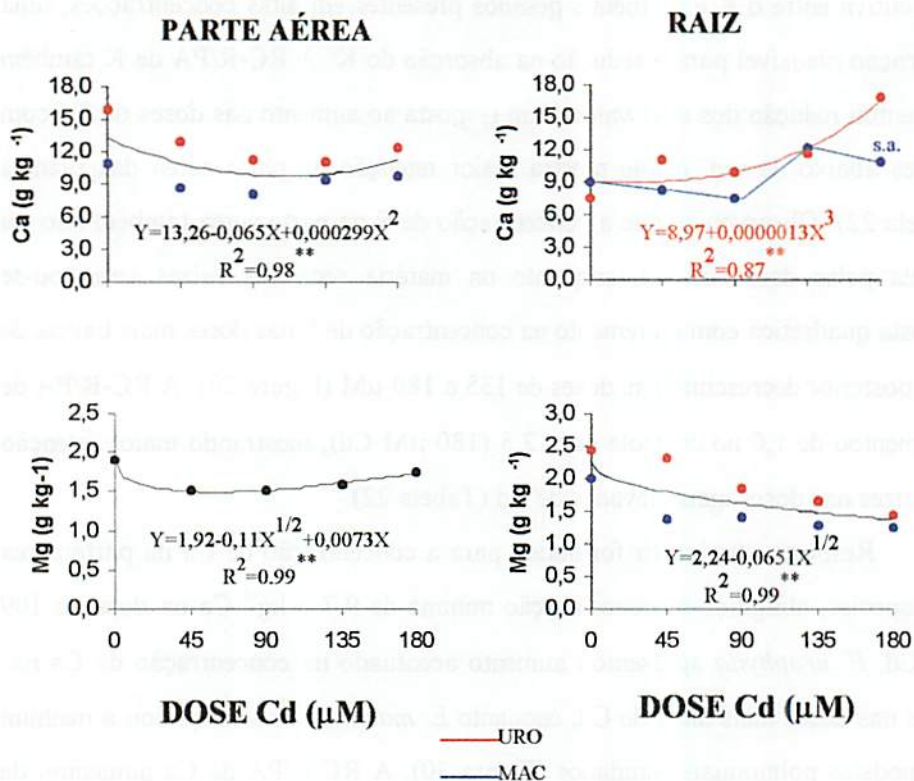


FIGURA 30. Concentração de Ca e Mg na matéria seca da parte aérea e raiz de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Cd em solução nutritiva. $^{**}p \leq 0,01$; s.a. – sem ajuste

19A). De modo geral, observou-se decréscimo na quantidade acumulada de todos os macronutrientes (Figuras 31 e 32), causado, em parte, pela redução no crescimento das plantas (Figura 7), embora, em alguns casos, tenha havido decréscimo da concentração de K, S, Ca e Mg nos tecidos.

O efeito das doses de Cd sobre os índices de translocação (IT) de P, K, S, Ca e Mg encontra-se na Tabela 24A. Não foi observado comportamento diferenciado entre as espécies para todos os macronutrientes, e apenas o IT de P não foi afetado significativamente pelas doses de Cd (Tabela 23). Os IT de K e Mg aumentaram nas doses mais elevadas de Cd, enquanto para o IT de S houve acentuado decréscimo mesmo na dose mais baixa em solução (45 μM Cd).

TABELA 23. Índices de translocação (%) de P, K, S, Ca e Mg para *E. maculata* (MAC) e *E. urophylla* (URO) crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de cádmio

	$P_{\bar{x}}$	$K_{\bar{x}}$	$S_{\bar{x}}$	$Ca_{\bar{x}}$	$Mg_{\bar{x}}$	
	0	74 a	77 c	73 a	82 a	71 b
	45	70 a	79 bc	62 b	76 ab	71 b
Cd (μM)	90	74 a	78 bc	60 b	78 ab	75 ab
	135	74 a	76 ab	58 b	76 b	80 a
	180	71 a	88 a	59 b	74 b	82 a

^x - Valores médios das espécies

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si (Tukey 5%)

A influência do aumento das doses de Pb sobre a concentração de P, K, S, Ca e Mg nos tecidos encontra-se nas Tabelas 11A e 12A. A concentração de P na parte aérea não variou de modo consistente com o aumento das doses de Pb, não se ajustando a nenhum dos modelos polinomiais estudados. Nas raízes, houve também

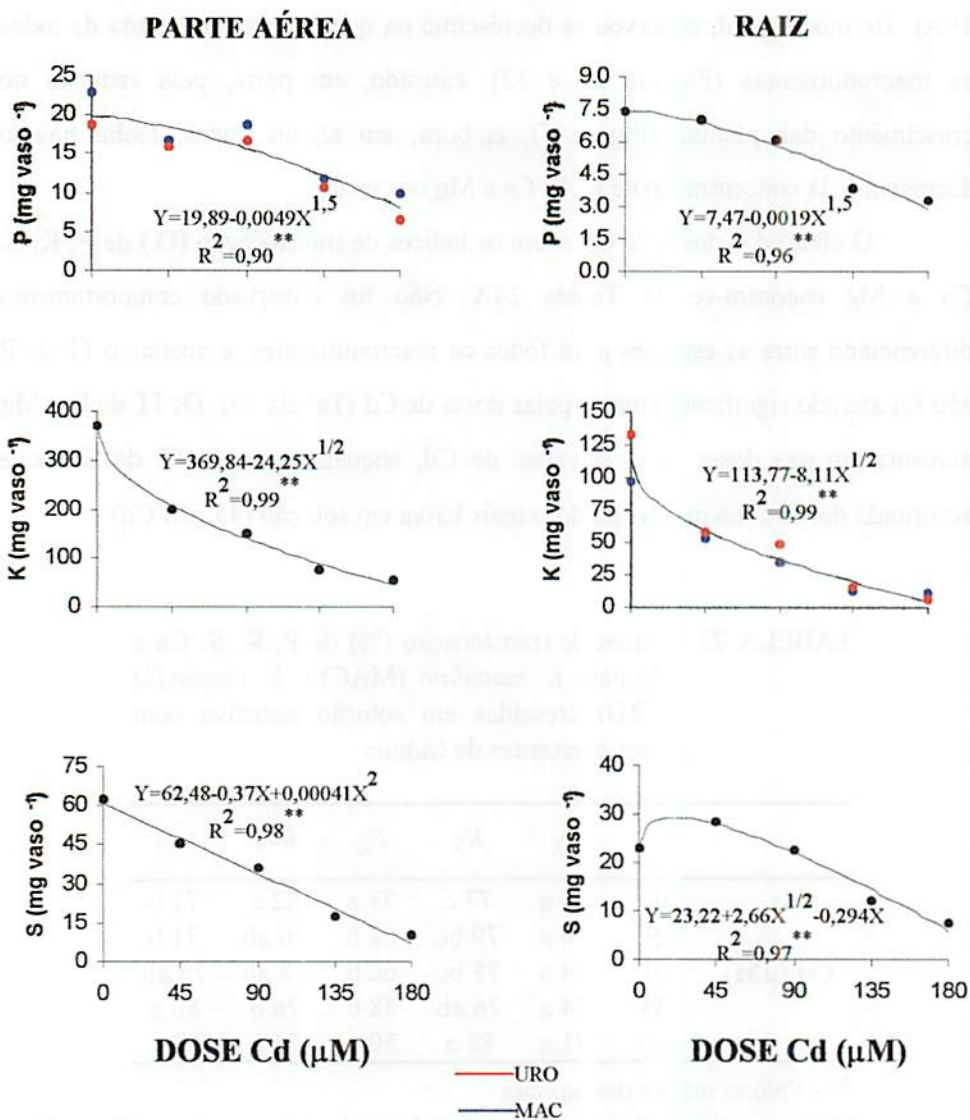


FIGURA 31. Acúmulo de P, K e S na parte aérea e raízes de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Cd em solução nutritiva. $**p \leq 0,01$

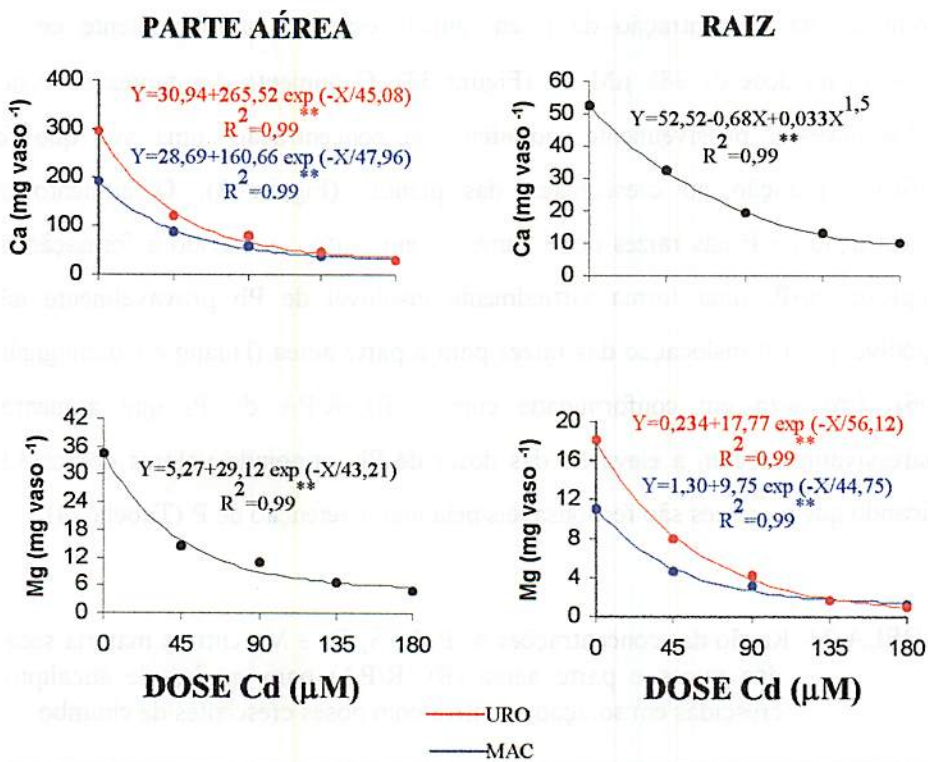


FIGURA 32. Acúmulo de Ca e Mg na parte aérea e raízes de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Cd em solução nutritiva. $**p \leq 0,01$

incremento na concentração de P em ambas espécies, principalmente em *E. urophylla* na dose de 388 μM Pb (Figura 33). O aumento dos teores de P nos tecidos deve-se, possivelmente, ao efeito de concentração, uma vez que foi verificada redução no crescimento das plantas (Figura 8). O aumento da concentração de P nas raízes pode, também, em parte, ser devido à formação do complexo Pb-P, uma forma virtualmente insolúvel de Pb provavelmente não disponível para translocação das raízes para a parte aérea (Huang e Cunningham, 1996). Isto está em conformidade com a RC-R/PA de P, que aumentou progressivamente com a elevação das doses de Pb, atingindo valores de até 3,9, indicando que as raízes são responsáveis pela maior retenção de P (Tabela 24).

TABELA 24. Razão das concentrações de P, K, S, Ca e Mg entre a matéria seca das raízes e parte aérea (RC-R/PA) para mudas de eucalipto crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de chumbo

Elemento/Espécie	Doses de Pb (μM)					Anava
	0	97	194	291	388	
$P_{\bar{x}}$	1,4	2,1	2,3	2,9	3,9	**
$K_{\bar{x}}$	1,1	0,8	0,9	1,1	0,8	NS
$S_{\bar{x}}$	1,6	2,1	1,3	0,7	0,4	**
Ca – <i>E. maculata</i>	1,3	1,5	1,2	1,2	1,3	*
Ca – <i>E. urophylla</i>	1,4	1,0	0,8	0,7	0,5	
Mg – <i>E. maculata</i>	0,8	0,6	0,7	0,5	0,4	*
Mg – <i>E. urophylla</i>	1,3	0,9	0,8	0,7	0,3	

\bar{x} - Valores médios das espécies

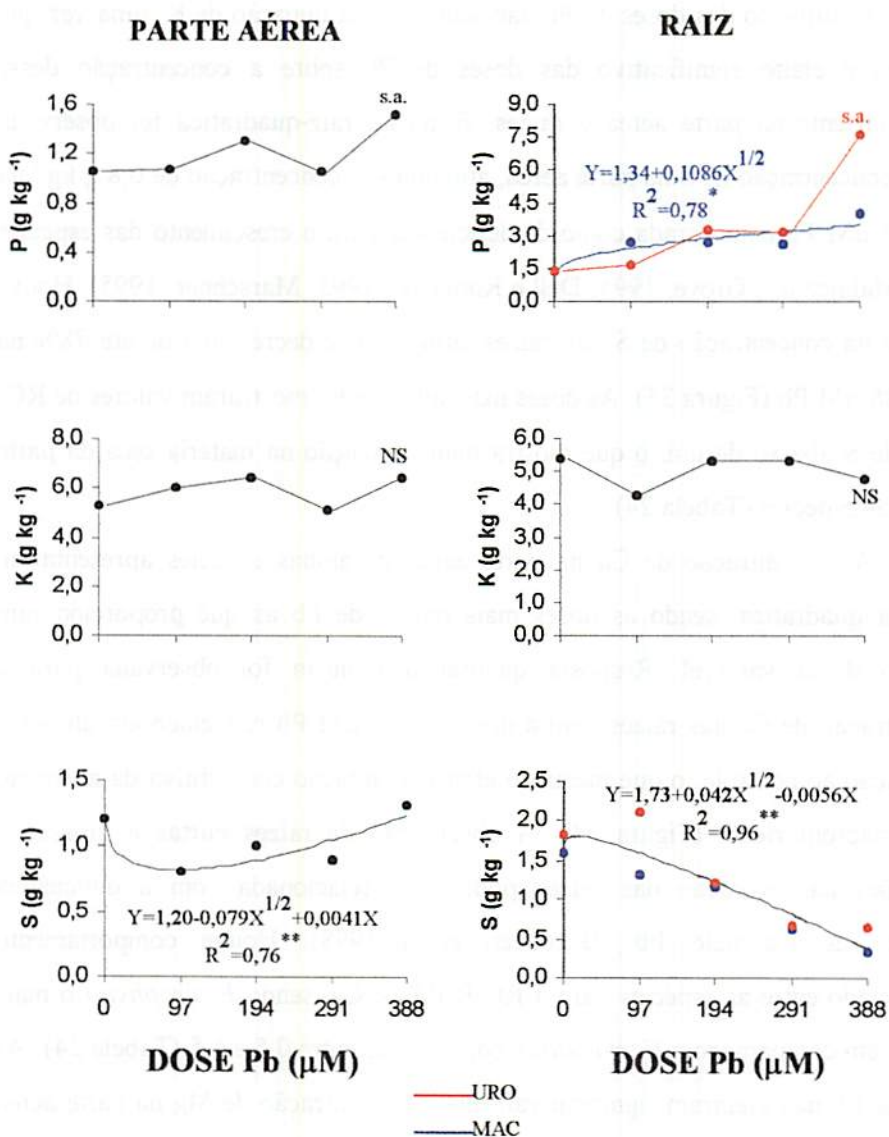


FIGURA 33. Concentração de P, K e S na matéria seca da parte aérea e raiz de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Pb em solução nutritiva. **p ≤ 0,01; *p ≤ 0,05; s.a. – sem ajuste; NS – não significativo

O aumento das doses de Pb não interferiu na nutrição de K, uma vez que não houve efeito significativo das doses de Pb sobre a concentração desse macronutriente na parte aérea e raízes. Resposta raiz-quadrática foi observada para a concentração de S na parte aérea, atingindo-se concentração de $0,8 \text{ g kg}^{-1}$ na dose $97 \text{ }\mu\text{M}$ Pb considerada como de deficiência para o crescimento das espécies (Dell, Malajczuk e Grove, 1995; Dell e Robinson, 1993; Marschner, 1995). Houve redução na concentração de S nas raízes, atingindo-se decréscimo de até 78% na dose $388 \text{ }\mu\text{M}$ Pb (Figura 33). As doses mais altas de Pb mostraram valores de RC-R/PA de S abaixo de um, o que mostra maior retenção na matéria seca da parte aérea das espécies (Tabela 24).

A concentração de Ca na parte aérea de ambas espécies apresentaram resposta quadrática, sendo as doses mais baixas de Pb as que proporcionaram redução dessa variável. Resposta quadrática também foi observada para a concentração de Ca nas raízes com a dose de $291 \text{ }\mu\text{M}$ Pb reduzindo em até 44% em relação ao controle, o que mostra o efeito de inibição competitiva da absorção desse macronutriente (Figura 34). A observação de raízes curtas e grossas e alterações na coloração das raízes pode estar relacionada com a deficiência induzida de Ca pelo Pb (Baccouch et al., 1998). Houve comportamento diferenciado entre as espécies para a RC-R/PA de Ca, sendo *E. urophylla* o mais afetado em comparação a *E. maculata*, com valores entre 0,5 e 1,5 (Tabela 24). As doses de Pb não afetaram significativamente a concentração de Mg na parte aérea das espécies, enquanto, nas raízes, verificou-se decréscimo de 62% em *E. urophylla* e de 51% em *E. maculata* na dose $388 \text{ }\mu\text{M}$ Pb, que indica alta competitividade pelos sítios de absorção entre Pb e Mg (Figura 34). Trabalhos realizados em areia com plântulas de *Fagus sylvatica* também mostraram redução progressiva na concentração de Mg nas raízes em resposta ao aumento de aplicações de Pb e Cd. Tal redução foi paralela a altos acúmulos desses metais nas

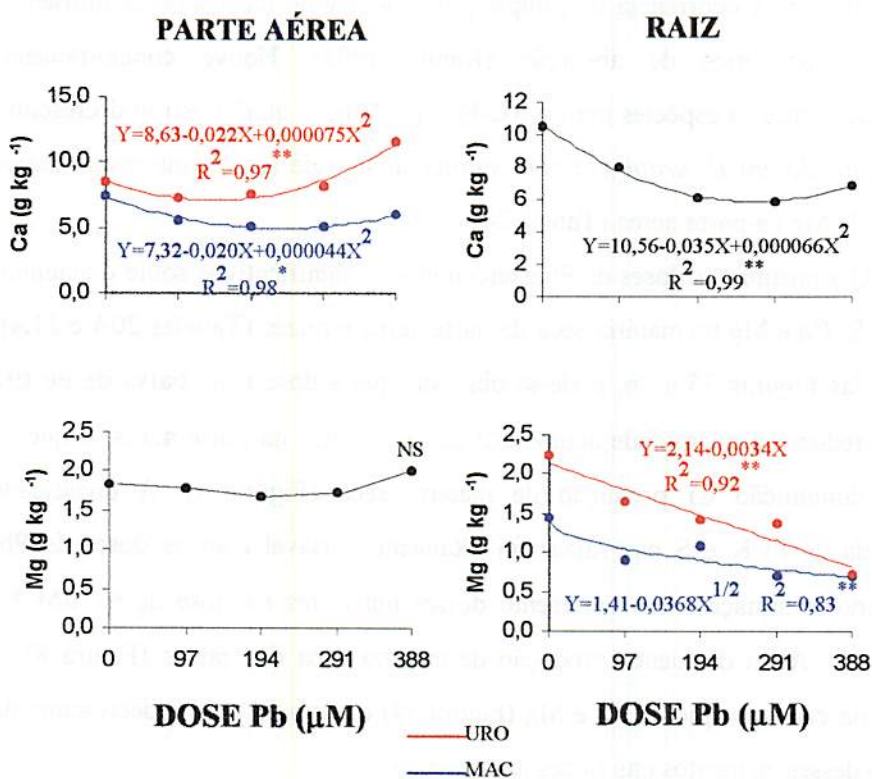


FIGURA 34. Concentração de Ca e Mg na matéria seca da parte aérea e raiz de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Pb em solução nutritiva. ** $p \leq 0,01$; * $p \leq 0,05$; NS. – não significativo

raízes, sugerindo a ocorrência de competição de íons e deslocamento de nutrientes catiônicos dos sítios de absorção (Kahle, 1993). Houve comportamento diferenciado entre as espécies para a RC-R/PA de Mg, o qual mostrou decréscimo mais acentuado em *E. urophylla* com valores abaixo de um, o que revela maior retenção de Mg na parte aérea (Tabela 24).

O aumento das doses de Pb exerceu efeitos significativos sobre o acúmulo de P, K, S, Ca e Mg na matéria seca da parte aérea e raízes (Tabelas 20A e 21A). Através das Figuras 35 e 36, pode-se observar que a dose mais baixa de Pb (97 μM Pb) reduziu a quantidade acumulada dos nutrientes na parte aérea, o que se deve à diminuição da produção de matéria seca (Figura 8). A quantidade acumulada de P, K e S nas raízes foi altamente variável com as doses de Pb, verificando-se situações de incremento desses nutrientes na dose de 97 μM Pb (Figura 35). Além da menor produção de matéria seca das raízes (Figura 8), a redução na concentração de Ca e Mg (Figura 34) contribuiu para o decréscimo do acúmulo desses elementos nas raízes das espécies.

O efeito do aumento das doses de Pb sobre os índices de translocação (IT) de P, K, S, Ca e Mg encontra-se na Tabela 25A. O IT de P apresentou elevado decréscimo em seus valores em função do aumento das doses de Pb (Tabela 25), que pode ser atribuído à formação do complexo Pb-P, uma forma virtualmente insolúvel de Pb provavelmente não disponível para translocação das raízes para a parte aérea (Huang e Cunningham, 1996). Segundo Brown et al. (1995), embora P não seja um componente de quaisquer ácidos orgânicos envolvidos em mecanismos de tolerância a metais pesados, a precipitação nas raízes pode estar envolvida em algum tipo de sistema secundário de tolerância. Os IT de Ca e K não foram afetados significativamente pelas doses de Pb, enquanto a dose 388 μM Pb aumentou o IT de S e Mg (Tabela 25). Esse incremento na translocação de S em resposta ao acúmulo de Pb nos tecidos pode estar relacionada com a produção de

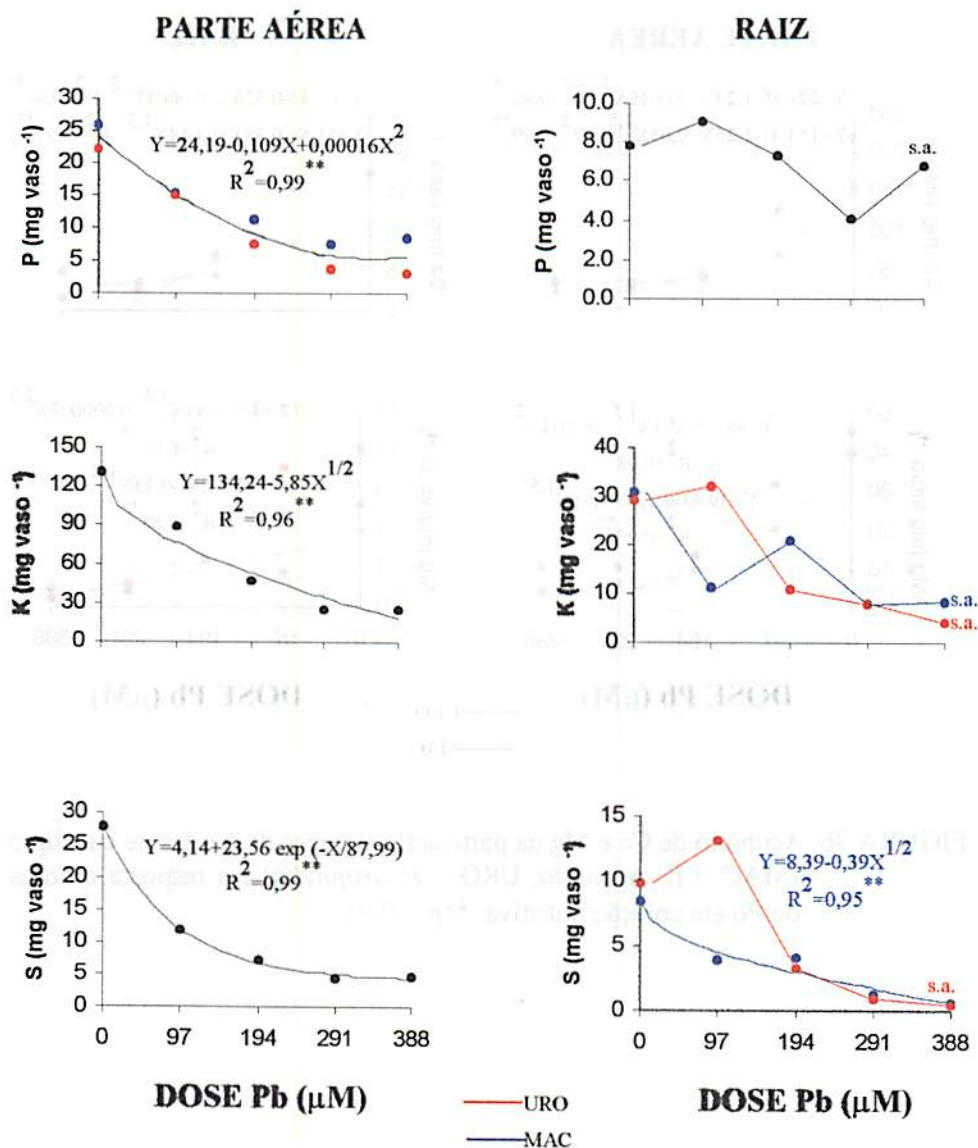


FIGURA 35. Acúmulo de P, K e S na parte aérea e raízes de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Pb em solução nutritiva. $**p \leq 0,01$; s.a. – sem ajuste polinomial

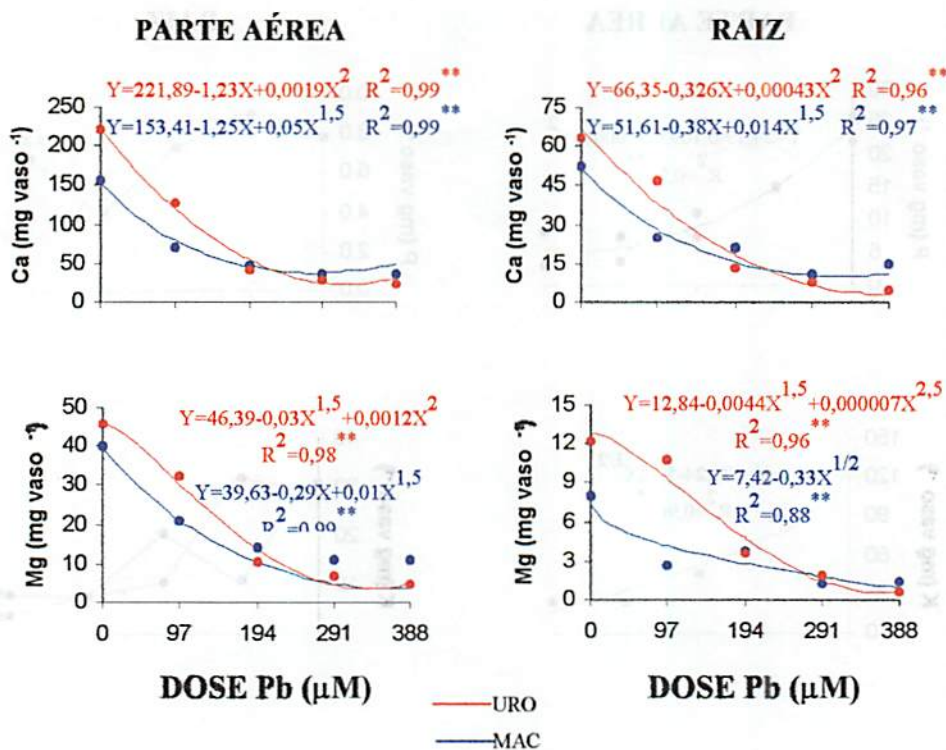


FIGURA 36. Acúmulo de Ca e Mg na parte aérea e raízes de mudas de eucalipto (MAC = *E. maculata*; URO = *E. urophylla*) em resposta a doses de Pb em solução nutritiva. ** $p \leq 0,01$

compostos intercelulares ricos em S, chamados fitoquelatinas (Fontes, 1992; Meharg, 1994).

TABELA 25. Índices de translocação (%) de P, K, S, Ca e Mg para *E. maculata* (MAC) e *E. urophylla* (URO) crescidas em solução nutritiva com doses crescentes de chumbo

	$P_{\bar{x}}$	$K_{\bar{x}}$	$S_{\bar{x}}$	$Ca_{\bar{x}}$	$Mg_{\bar{x}}$	
	0	76 a	80 a	73 bc	76 a	81 b
	97	64 ab	80 a	62 c	74 a	83 ab
Pb (μM)	194	55 bc	75 a	69 bc	73 a	78 b
	291	54 bc	75 a	81 ab	78 a	84 ab
	388	44 c	78 a	88 a	77 a	88 a

\bar{x} - Valores médios das espécies

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si (Tukey 5%)

5. CONCLUSÕES

– Mudanças de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* mostraram-se sensíveis às doses crescentes de Zn, Cu, Cd e Pb em solução nutritiva, exibindo sintomas acentuados de fitotoxidez manifestados principalmente como murchamento, clorose e necrose dos tecidos, morte das gemas apicais e inibição do crescimento da parte aérea e raízes;

– a fitotoxidez destes metais para as espécies de eucalipto decresce na seguinte ordem: Cd>Cu>Pb>Zn;

– *E. maculata* apresentou doses críticas na solução mais altas para Zn e Cd, enquanto *E. urophylla* o foi para Cu e Pb;

– os níveis críticos de toxidez de Cu, Cd e Pb estão próximos da faixa considerada excessiva para o crescimento das espécies, enquanto, para Zn, os valores estimados são superiores;

– as espécies estudadas apresentaram comportamento diferenciado em relação à elevação das doses dos metais pesados na solução, sendo o *E. maculata* mais tolerante a Zn e Cd, enquanto *E. urophylla*, a Cu e Pb;

– Cd e Zn são translocados em grande quantidade das raízes para a parte aérea das plantas, enquanto Cu e Pb acumulam-se nas raízes;

– houve intensa interação entre os metais em solução e a absorção de outros nutrientes pelas plantas: Zn reduziu a concentração de Fe e Ca a níveis considerados deficientes para o crescimento do eucalipto, enquanto Cd e Pb afetaram Mg e S respectivamente;

– a absorção e translocação de Fe são altamente inibidas pelas doses crescentes de todos os metais estudados, sendo esta deficiência induzida uma das possíveis causas da fitotoxidez;

– o potencial de acumulação e o fator de transferência de metais pesados da solução para os tecidos mostram comportamentos distintos das espécies em relação a cada metal;

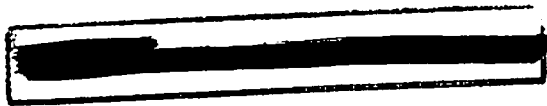
– os resultados evidenciam as dificuldades para interpretação dos efeitos dos metais pesados sobre as espécies em solos multi-contaminados.

6. 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, v.22, n.1, p.21-26, 1998.
- AGARWALA, S.C.; BISHT, S.S.; SHARMA, C.P. Relative effectiveness of certain heavy metals in producing toxicity and symptoms of iron deficiency in barley. *Canadian Journal of Botany*, Ottawa, v.55, p.1299-1307, 1977.
- ALLOWAY, B.J. *Heavy metals in soils*. New York: John Willey, 1993. 339p.
- ARDUINI, I.; GODBOLD, D.L.; ONNIS, A. Cadmium and copper uptake and in Mediterranean tree seedlings. *Physiologia Plantarum*, Copenhagen, v.97, p.111-117, 1996.
- BACCÒUCH, S.; CHAOU, A.; EI FERJANI, E. Nickel toxicity: effects on growth and metabolism of maize. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v.21, n.3, p.577-588, 1998.
- BAKER A.J.M. Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v.3, n.1-4, p.643-654, 1981.
- BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, Ch. Respuestas de las plantas a la contaminación por metales pesados. *Suelo y Planta*, v.2, n.2, p.345-361, 1992.
- BRECKLE, S.-W.; KAHLE, H. Effects of Pb and Cd on root growth of young beech trees. In: III Symposium of Root ecology and its practical application. Klagenfurt, v. 1, p.241-244, 1992a.
- BRECKLE, S.-W.; KAHLE, H. Effects of toxic heavy metals (Cd, Pb) on growth and mineral nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Vegetatio*, Belgium, v. 101, p.43-53, 1992b.
- BRUNE, A.; DIETZ K.J. A comparative analysis of element composition of roots and leaves of barley seedlings grown in the presence of toxic Cd, Mo, Ni and

- Zn concentration. **Journal Plant Nutrition**, New York, v.18, p.853–868, 1995.
- BROWN, S.L.; CHANEY, R.L., ANGLE, J.S.; BAKER, A.J.M. Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.59, p.125–133, 1995.
- BURTON K.W.; MORGAN, E. The influence of heavy metals upon the growth of sitka-spruce in South Wales forest. **Plant and Soil**, Netherlands, v.78, p.271-282, 1984.
- COTRIM, A. R. Metais pesados na agricultura, conseqüências das elevadas concentrações de mercúrio, cádmio e chumbo no solo. Instituto de química-UNICAMP, Campinas, 1995. 48p.
- CROOKE, W.M. Effect of heavy-metal toxicity on the cation-exchange capacity of plant roots. **Soil Science**, Baltimore, v.86, n.5, p.231-240, 1958.
- DAVIS, R.D.; BECKETT, P.H.T.; WOLLAN, E. Critical levels of twenty potentially toxic elements in young spring barley. **Plant and Soil**, Netherlands, v.49, p.395-408, 1978.
- DECHEN, A.R.; BATAGLIA, O.C.; SANTOS, W.R. dos. Conceitos fundamentais da interpretação da análise de plantas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 21, Petrolina, 1995. Anais..., Petrolina: EMBRAPA-CPATSA/SBCS, 1995. p.87-115.
- DELL, B.; MALAJCZUK, N.; GROVE, T.S. Nutrient disorders in plantation eucalypts. Canberra, BPD Graphic Associates, 1995.104p.
- DELL, B.; ROBINSON, J.M. Symptoms of mineral nutrient deficiencies and the nutrient concentration ranges in seedlings of *Eucalyptus maculata* Hook. **Plant and Soil**, Netherlands, v.155–156, p.255–261, 1993.
- EL-JAOUAL, T.; COX, D.A. Manganese toxicity in plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.21, n.2, p.353–386, 1998.

- EUCLYDES, R.F. Manual de Utilização do Programa SAEG (Sistema para Análises Estatísticas e Genética). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. 1983, 59p.**
- FLORIJN, P.J.; VAN BEUSICHEM, M.L. Cadmium distribution in maize inbred lines: Effects of pH and level of Cd supply. Plant and Soil, Netherlands, v.153, p.79-84, 1993.**
- FODOR, F.; CSEH, E.; VARGA, A.; ZÁRAY, G. Lead uptake, distribution, and remobilization in cucumber. Journal of Plant Nutrition, New York, v.21, n.7, p.1363-1373, 1998.**
- FONTES, R.L.F. Zinc toxicity in soybeans as affected by plant iron and sulfur. Carolina do Norte, 1992. 138p. (Tese de Ph.D.)**
- FONTES, R.L.F.; COX, R. Iron deficiency and zinc toxicity in soybean grown in nutrient solution with different levels of sulfur. Journal of Plant Nutrition, New York, v.21, n.8, p. 1715-1722, 1998a.**
- FONTES, R.L.F.; COX, R. Zinc toxicity in soybean grown at high iron concentration in nutrient solution. Journal of Plant Nutrition, New York, v.21, n.8, p. 1723-1730, 1998b.**
- FONTES, R.L.F.; SOUSA, C.R.F. Toxicidade de cádmio em plantas de soja crescidas em diferentes concentrações de enxofre. Anais Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Manaus, n.22, p.545-546, 1996.**
- GRAZZIOTTI, P.H.; SANTOS, J.G.D.; SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M. de S. Crescimento e teores de nutrientes e metais pesados em mudas de *Melaleuca leucadendra* em solo contaminado por metais pesados. Trabalho enviado para Revista Brasileira de Ciência do Solo, 1999.**
- GRILL, E.; WINNACKER, E.L.; MEINHART, H.L. Phytochelatins, a class of heavy-metal-binding peptides from plants, are functionally analogous to metallothioneins. Proc. Natl. Acad. Sci., v.84, p.439-443, 1987.**
- GUSSASSON, M.; ADALSTEINSSON, P.J.; ASP, H. Cadmium and copper interactions on the accumulation and distribution of Cd and Cu in birch (*Betula Pendula* Roth) seedlings. Plant and Soil, Netherlands, n.171, p.185-187, 1995.**



- HÄMMANN, M.; GUPTA, S.K. Derivation of trigger and clean-up values for inorganic pollutants in the soil. **Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape – SAEFL, Berne, n. 83, p.1-105, 1998.**
- 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, Ottawa, v.60, p.2674-2681, 1982.**
- HUANG, J.W.; CUNNINGHAM, S.D. Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. **New Phytologist, London, v.134, p. 75–84, 1996.**
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. Trace elements in soils and plants. **Boca Raton: cRc Press, 1985. 315p.**
- KAHLE, H. Response of roots of trees to heavy metals. **Environmental and Experimental Botany, Great Britain, v. 33, n.1, p.99-119, 1993.**
- KASTORI, R.; PLESNICAR M.; SAZAC, Z.; PANCOVIC D.; ARSENJEVIC-MAKSIMOVIC, I. Effect os excess lead on sunflower growth and photosynthesis. **Journal of Plant Nutrition, New York, v.21, n.1, p. 75–85, 1998.**
- KELTJENS, W.G.; van BEUSICHEM, M.L. Phytochelatins as biomarkers for heavy metal toxicity in maize: single metal effects of copper and cadmium. **Journal of Plant Nutrition, New York, v.21, n.4, p.635–648, 1998.**
- MACNICOL, R.D.; BECKETT, P.H.T. Critical tissue concentrations of potentially toxic elements. **Plant and Soil, Netherlands, v.85, p.107–129, 1985.**
- MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo: ed. Agronômica Ceres, 1980. 251p.
- MALAVOLTA, E. Fertilizantes e seu impacto ambiental: micronutrientes e metais pesados, mitos, mistificações e fatos. São Paulo: ProduQuímica, 1994. 153p.

- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFÓS, 1989. 201p.
- MARCHIOL, L.; LEITA, L.; MARTIN, M.; PERESSOTTI, A; ZERBI, G. Physiological responses of two soybean cultivars to cadmium. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 25, p.562-566, 1996.
- MARQUES, T.C.L.L. de S. e M. **Crescimento e absorção mineral de mudas de espécies arbóreas em material de solo contaminado com metais pesados**. Lavras - UFLA, 1996. 116p. (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 2nd edn. Academic press Inc., San Diego, CA, USA, 1995, 902 p.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. Bern: Intern. Postash Institute, 1987. 687p.
- MEHARG, A.A. Integrated tolerance mechanisms: constitutive and adaptive plant responses to elevated metal concentrations in the environment. **Plant, Cell and Environmental**, Osney Mead, v.17, p.989-993, 1994.
- METZGER, L.; FOUCHAULT, I.; GLAD, C.; PROST, R. TEPFER, D. Estimation of cadmium availability using transformed roots. **Plant and Soil**, Netherlands, v.143, p.249-257, 1992.
- MOURA FILHO, G.; CRUZ, C.D. **Fcalc for Windows v. 1.1 - Programa para cálculo do F corrigido em análises de regressão: Teste dos coeficientes**, Universidade Federal de Viçosa, 1996
- MURPHY, A.; TAIZ, L. Correlation between potassium efflux and copper sensitivity in 10 *Arabidopsis* ecotypes. **New Phytologist**, London, v.136, p.211-222, 1997.
- OBATA, H.; UMEBAYASHI, M. Effects of cadmium on mineral nutrient concentrations in plants differing in tolerance for cadmium. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.20, n.1, p.97-105, 1997.

- OLIVEIRA, J.A. de; OLIVA, M.A.; CAMBRAIA, J.; VENEGAS, V.H.A. Absorption, accumulation and distribution of cadmium by two soybean cvs. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, Brasília, v.6, n.2, p.91-95, 1994a.
- OLIVEIRA, J.A. de; OLIVA, M.A.; CAMBRAIA, J. Effects of cadmium on chlorophyll contents on peroxidase activity in soybean. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, Brasília, v.6, n.2, p.97-101, 1994b.
- POLLARD, A.J.; BAKER, A.J.M. Deterrence of herbivory by zinc hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens* (Brassicaceae). *New Phytologist*, London, v.135, p.655-658, 1997.
- PUNZ, W.F.; SIEGHARDT, H. The response of roots of herbaceous plant species to heavy metals. *Environmental and Experimental Botany*, Great Britain, v.44, n.1, p.85-98, 1993.
- SAMARAKOON, A.B.; RAUSER, W. Carbohydrate level and photoassimilate export from leaves of *Phaseolus vulgaris* exposed to excess cobalt, nickel and zinc. *Plant Physiology*, Rockville, n.63, p.1165-1169, 1979.
- SCHMIDT, W.; BARTELS, M.; TITTEL, J.; FUHNER, C. Physiological effects of copper on iron acquisition processes in *Plantago*. *New Phytologist*, London, v.135, p.659-666, 1997.
- SHEN, Z.; ZHANG, F.; ZHANG, F. Toxicity of copper and zinc in seedlings of mung bean and inducing accumulation of polyamine. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v.21, n.6, p.1153-1162, 1998.
- SHAW, A.J. *Heavy metal tolerance in plants: Evolutionary aspects*. New York, cRc Press, 1989. 355p.
- SMITH, P.F.; SPECHT, A.W. Heavy-metal nutrition and iron chlorosis of citrus seedlings. *Plant Physiology*, Rockville, s/n, p.371-382, 1952.
- VARENNE, A.; TORRES, M.O.; COUTINHO, J.F.; ROCHA, M.M.G.S.; NETO, M.M.P.M. Effects of heavy metals on the growth and mineral composition of a nickel hyperaccumulator. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v.19, n.5, p.669-676, 1996.

- YANG, X.; BALIGAR, V.C.; MARTENS, D.C.; CLARK, R.B.** Influx, transport, and accumulation of cadmium in plant species grown at different Cd^{2+} activities. **Journal Environmental Science Health**, v.30, n.4, p.569-583, 1995.
- 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, n.19, v.2, p.265-279, 1996.
- YE, Z.H.; BAKER, A.J.M.; WONG, M.H.; WILLIS, A.J.** Zinc, lead and cadmium tolerance, uptake and accumulation by *Typha latifolia*. **New Phytologist**, London, v. 136, p.469-480, 1997.
- WOOLHOUSE, H.W.** Toxicity and tolerance in the responses of plant to metals. In: O.L. Lange et al. (ed.), **Encyclopedia of Plant Physiology**, Berlin, New Series, v.12C, p.245-300, 1983.

ANEXOS

ANEXO A	Página
TABELA 1A Resumo da ANAVA para os parâmetros vegetativos avaliados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Zn.....	107
TABELA 2A Resumo da ANAVA para os parâmetros vegetativos avaliados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cu.....	108
TABELA 3A Resumo da ANAVA para os parâmetros vegetativos avaliados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cd.....	109
TABELA 4A Resumo da ANAVA para os parâmetros vegetativos avaliados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Pb.....	110
TABELA 5A Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Zn.....	111
TABELA 6A Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Zn.....	112
TABELA 7A Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cu.....	113

(...Continua...)

ANEXO A	Página
TABELA 8A Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cu.....	114
TABELA 9A Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cd.....	115
TABELA 10A Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cd.....	116
TABELA 11A Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Pb.....	117
TABELA 12A Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Pb.....	118
TABELA 13A Equações de regressão para determinação dos níveis críticos de toxidez de Zn, Cu, Cd e Pb em <i>Eucalyptus maculata</i> e <i>Eucalyptus urophylla</i>	119
TABELA 14A Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Zn.....	120
TABELA 15A Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Zn.....	121

(...Continua...)

TABELA 16A	Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cu.....	122
TABELA 17A	Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cu.....	123
TABELA 18A	Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cd.....	124
TABELA 19A	Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cd.....	125
TABELA 20A	Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Pb.....	126
TABELA 21A	Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Pb.....	127
TABELA 22A	Resumo da ANAVA para os índices de translocação (IT) de nutrientes e metais pesados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Zn.....	128

(...Continua...)

ANEXO A**Página**

TABELA 23A	Resumo da ANAVA para os índices de translocação (IT) de nutrientes e metais pesados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cu.....	129
TABELA 24A	Resumo da ANAVA para os índices de translocação (IT) de nutrientes e metais pesados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cd.....	130
TABELA 25A	Resumo da ANAVA para os índices de translocação (IT) de nutrientes e metais pesados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Pb.....	131
TABELA 26A	Efeito das doses de Zn, Cu, Cd e Pb na concentração de metais pesados e nutrientes na parte aérea de <i>E. maculata</i> (MAC) e <i>E. urophylla</i> (URO).....	132

TABELA 1A. Resumo da ANAVA para os parâmetros vegetativos avaliados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Zn

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Matéria seca (Raiz)			C.V. = 38,26
Doses de Zn (Zn)	4	73,50	0,01
Espécies (E)	1	0,89	NS
Zn X E	4	0,24	NS
Matéria seca (Parte aérea)			C.V. = 22,30
Doses de Zn (Zn)	4	74,92	0,01
Espécies (E)	1	1,50	NS
Zn X E	4	1,75	NS
R/Pa			C.V. = 24,20
Doses de Zn (Zn)	4	34,80	0,01
Espécies (E)	1	0,71	NS
Zn X E	4	1,80	NS

R/Pa = Razão entre matéria seca da raiz e parte aérea

TABELA 2A. Resumo da ANAVA para os parâmetros vegetativos avaliados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cu

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Matéria seca (Raiz)			C.V. = 25,56
Doses de Cu (Cu)	4	157,00	0,01
Espécies (E)	1	17,34	0,01
Cu X E	4	16,39	0,01
Matéria seca (Parte aérea)			C.V. = 31,40
Doses de Cu (Cu)	4	98,50	0,01
Espécies (E)	1	6,40	0,05
Cu X E	4	5,73	0,01
R/Pa			C.V. = 33,22
Doses de Cu (Cu)	4	7,86	0,01
Espécies (E)	1	1,26	NS
Cu X E	4	0,64	NS
Área Foliar (cm²)			C.V. = 40,12
Doses de Cu (Cu)	4	74,30	0,01
Espécies (E)	1	8,33	0,01
Cu X E	4	6,73	0,01
Comprimento de Raiz (m)			C.V. = 20,33
Doses de Cu (Cu)	4	204,15	0,01
Espécies (E)	1	115,21	0,01
Cu X E	4	40,07	0,01
C/MSR			C.V. = 23,41
Doses de Cu (Cu)	4	11,23	0,01
Espécies (E)	1	88,80	0,01
Cu X E	4	7,56	0,01

R/Pa = Razão entre matéria seca da raiz e parte aérea

C/MSR = Razão entre comprimento de raiz e matéria seca de raiz

TABELA 3A. Resumo da ANAVA para os parâmetros vegetativos avaliados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cd

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Matéria seca (Raiz)			C.V. = 25,62
Doses de Cd (Cd)	4	79,65	0,01
Espécies (E)	1	1,74	NS
Cd X E	4	3,53	0,05
Matéria seca (Parte aérea)			C.V. = 26,31
Doses de Cd (Cd)	4	60,99	0,01
Espécies (E)	1	0,07	NS
Cd X E	4	0,23	NS
R/Pa			C.V. = 20,60
Doses de Cd (Cd)	4	2,01	NS
Espécies (E)	1	0,07	NS
Cd X E	4	2,72	NS
Área Foliar (cm²)			C.V. = 31,76
Doses de Cd (Cd)	4	59,52	0,01
Espécies (E)	1	4,11	NS
Cd X E	4	1,80	NS
Comprimento de Raiz (m)			C.V. = 32,24
Doses de Cd (Cd)	4	23,43	0,01
Espécies (E)	1	7,10	0,05
Cd X E	4	3,65	0,05
C/MSR			C.V. = 20,49
Doses de Cd (Cd)	4	12,71	0,01
Espécies (E)	1	18,02	0,01
Cd X E	4	1,42	NS

R/Pa = Razão entre matéria seca da raiz e parte aérea

C/MSR = Razão entre comprimento de raiz e matéria seca de raiz

TABELA 4A. Resumo da ANAVA para os parâmetros vegetativos avaliados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Pb

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Matéria seca (Raiz)			C.V. = 41,06
Doses de Pb (Pb)	4	15,67	0,01
Espécies (E)	1	0,17	NS
Pb X E	4	3,92	0,05
Matéria seca (Parte aérea)			C.V. = 32,78
Doses de Pb (Pb)	4	40,09	0,01
Espécies (E)	1	0,17	NS
Pb X E	4	2,65	NS
R/Pa			C.V. = 25,49
Doses de Pb (Pb)	4	3,64	0,05
Espécies (E)	1	4,08	NS
Pb X E	4	1,29	NS
Área Foliar (cm²)			C.V. = 32,45
Doses de Pb (Pb)	4	36,90	0,01
Espécies (E)	1	0,73	NS
Pb X E	4	4,96	0,01
Comprimento de Raiz (m)			C.V. = 40,86
Doses de Pb (Pb)	4	18,88	0,01
Espécies (E)	1	6,29	0,05
Pb X E	4	3,75	0,05
C/MSR			C.V. = 32,36
Doses de Pb (Pb)	4	0,87	NS
Espécies (E)	1	19,21	0,01
Pb X E	4	1,77	NS

R/Pa = Razão entre matéria seca da raiz e parte aérea

C/MSR = Razão entre comprimento de raiz e matéria seca de raiz

TABELA 5A. Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Zn

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Cobre (mg kg⁻¹)			C.V. = 28,43
Doses de Zn	4	16,07	0,01
Espécies (E)	1	123,81	0,01
Zn X E	4	27,75	0,01
Zinco (mg kg⁻¹)			C.V. = 22,26
Doses de Zn	4	49,98	0,01
Espécies (E)	1	8,62	0,01
Zn X E	4	3,11	0,05
Manganês (mg kg⁻¹)			C.V. = 13,58
Doses de Zn	4	117,66	0,01
Espécies (E)	1	4,46	0,05
Zn X E	4	0,96	NS
Ferro (mg kg⁻¹)			C.V. = 22,82
Doses de Zn	4	28,84	0,01
Espécies (E)	1	11,44	0,01
Zn X E	4	1,46	NS
Magnésio (g kg⁻¹)			C.V. = 18,96
Doses de Zn	4	21,89	0,01
Espécies (E)	1	0,03	NS
Zn X E	4	0,40	NS
Cálcio (g kg⁻¹)			C.V. = 18,76
Doses de Zn	4	9,67	0,01
Espécies (E)	1	0,60	NS
Zn X E	4	0,36	NS
Fósforo (g kg⁻¹)			C.V. = 17,73
Doses de Zn	4	11,88	0,01
Espécies (E)	1	16,06	0,01
Zn X E	4	0,62	NS
Enxofre (g kg⁻¹)			C.V. = 10,30
Doses de Zn	4	11,00	0,01
Espécies (E)	1	3,82	NS
Zn X E	4	3,12	0,05
Potássio (g kg⁻¹)			C.V. = 11,59
Doses de Zn	4	2,34	NS
Espécies (E)	1	3,10	NS
Zn X E	4	2,57	NS

TABELA 6A. Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Zn

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Cobre (mg kg⁻¹)			C.V. = 39,61
Doses de Zn	4	17,41	0,01
Espécies (E)	1	54,74	0,01
Zn X E	4	24,23	0,01
Zinco (mg kg⁻¹)			C.V. = 22,29
Doses de Zn	4	50,01	0,01
Espécies (E)	1	13,76	0,01
Zn X E	4	1,56	NS
Manganês (mg kg⁻¹)			C.V. = 34,84
Doses de Zn	4	15,31	0,01
Espécies (E)	1	8,12	0,01
Zn X E	4	3,76	0,05
Ferro (mg kg⁻¹)			C.V. = 17,14
Doses de Zn	4	115,43	0,01
Espécies (E)	1	2,47	NS
Zn X E	4	7,80	0,01
Magnésio (g kg⁻¹)			C.V. = 13,93
Doses de Zn	4	144,03	0,01
Espécies (E)	1	13,50	0,01
Zn X E	4	14,32	0,01
Cálcio (g kg⁻¹)			C.V. = 15,36
Doses de Zn	4	8,60	0,01
Espécies (E)	1	14,33	0,01
Zn X E	4	6,97	0,01
Fósforo (g kg⁻¹)			C.V. = 23,76
Doses de Zn	4	11,26	0,01
Espécies (E)	1	0,14	NS
Zn X E	4	3,16	0,05
Enxofre (g kg⁻¹)			C.V. = 8,99
Doses de Zn	4	54,67	0,01
Espécies (E)	1	166,90	0,01
Zn X E	4	52,60	0,01
Potássio (g kg⁻¹)			C.V. = 22,84
Doses de Zn	4	130,98	0,01
Espécies (E)	1	0,91	NS
Zn X E	4	3,47	0,05

TABELA 7A. Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cu

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Cobre (mg kg⁻¹)			C.V. = 41,81
Doses de Cu (Cu)	4	71,12	0,01
Espécies (E)	1	0,07	NS
Cu X E	4	0,18	NS
Zinco (mg kg⁻¹)			C.V. = 15,09
Doses de Cu (Cu)	4	22,37	0,01
Espécies (E)	1	9,20	0,01
Cu X E	4	3,36	0,05
Manganês (mg kg⁻¹)			C.V. = 15,90
Doses de Cu (Cu)	4	21,38	0,01
Espécies (E)	1	5,37	0,05
Cu X E	4	1,93	NS
Ferro (mg kg⁻¹)			C.V. = 19,93
Doses de Cu (Cu)	4	18,40	0,01
Espécies (E)	1	24,98	0,01
Cu X E	4	0,21	NS
Magnésio (g kg⁻¹)			C.V. = 9,90
Doses de Cu (Cu)	4	48,12	0,01
Espécies (E)	1	4,02	NS
Cu X E	4	1,59	NS
Cálcio (g kg⁻¹)			C.V. = 15,00
Doses de Cu (Cu)	4	27,34	0,01
Espécies (E)	1	7,32	0,05
Cu X E	4	1,29	NS
Fósforo (g kg⁻¹)			C.V. = 14,03
Doses de Cu (Cu)	4	90,85	0,01
Espécies (E)	1	0,95	NS
Cu X E	4	7,28	0,01
Enxofre (g kg⁻¹)			C.V. = 10,82
Doses de Cu (Cu)	4	76,58	0,01
Espécies (E)	1	0,71	NS
Cu X E	4	8,23	0,01
Potássio (g kg⁻¹)			C.V. = 14,00
Doses de Cu (Cu)	4	41,81	0,01
Espécies (E)	1	6,20	0,05
Cu X E	4	3,06	0,05

TABELA 8A. Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cu

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Cobre (mg kg⁻¹)			C.V. = 21,94
Doses de Cu (Cu)	4	203,41	0,01
Espécies (E)	1	94,34	0,01
Cu X E	4	28,61	0,01
Zinco (mg kg⁻¹)			C.V. = 26,11
Doses de Cu (Cu)	4	23,61	0,01
Espécies (E)	1	4,65	0,05
Cu X E	4	24,00	0,01
Manganês (mg kg⁻¹)			C.V. = 36,58
Doses de Cu (Cu)	4	7,37	0,01
Espécies (E)	1	7,68	0,05
Cu X E	4	0,78	NS
Ferro (mg kg⁻¹)			C.V. = 26,43
Doses de Cu (Cu)	4	64,51	0,01
Espécies (E)	1	68,36	0,01
Cu X E	4	13,56	0,01
Magnésio (g kg⁻¹)			C.V. = 15,84
Doses de Cu (Cu)	4	80,58	0,01
Espécies (E)	1	76,47	0,01
Cu X E	4	12,94	0,01
Cálcio (g kg⁻¹)			C.V. = 14,02
Doses de Cu (Cu)	4	0,62	NS
Espécies (E)	1	6,17	0,05
Cu X E	4	2,05	NS
Fósforo (g kg⁻¹)			C.V. = 17,66
Doses de Cu (Cu)	4	67,71	0,01
Espécies (E)	1	3,70	NS
Cu X E	4	11,56	0,01
Enxofre (g kg⁻¹)			C.V. = 12,49
Doses de Cu (Cu)	4	2,96	0,05
Espécies (E)	1	29,98	0,01
Cu X E	4	0,81	NS
Potássio (g kg⁻¹)			C.V. = 21,42
Doses de Cu (Cu)	4	36,01	0,01
Espécies (E)	1	18,92	0,01
Cu X E	4	0,54	NS

TABELA 9A. Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cd

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Cádmio (mg kg⁻¹)			C.V. = 37,30
Doses de Cd (Cd)	4	24,06	0,01
Espécies (E)	1	1,47	NS
Cd X E	4	0,32	NS
Cobre (mg kg⁻¹)			C.V. = 31,09
Doses de Cd (Cd)	4	4,42	0,01
Espécies (E)	1	10,13	0,01
Cd X E	4	2,28	NS
Zinco (mg kg⁻¹)			C.V. = 20,62
Doses de Cd (Cd)	4	8,79	0,01
Espécies (E)	1	7,28	0,05
Cd X E	4	4,23	0,01
Manganês (mg kg⁻¹)			C.V. = 24,81
Doses de Cd (Cd)	4	20,80	0,01
Espécies (E)	1	8,44	0,01
Cd X E	4	2,06	NS
Ferro (mg kg⁻¹)			C.V. = 21,06
Doses de Cd (Cd)	4	4,11	0,01
Espécies (E)	1	0,14	NS
Cd X E	4	1,24	NS
Magnésio (g kg⁻¹)			C.V. = 13,42
Doses de Cd (Cd)	4	4,90	0,01
Espécies (E)	1	0,13	NS
Cd X E	4	1,61	NS
Cálcio (g kg⁻¹)			C.V. = 12,69
Doses de Cd (Cd)	4	8,13	0,01
Espécies (E)	1	56,85	0,01
Cd X E	4	1,80	NS
Fósforo (g kg⁻¹)			C.V. = 16,84
Doses de Cd (Cd)	4	31,59	0,01
Espécies (E)	1	6,65	0,05
Cd X E	4	0,60	NS
Enxofre (g kg⁻¹)			C.V. = 30,17
Doses de Cd (Cd)	4	1,99	NS
Espécies (E)	1	7,33	0,05
Cd X E	4	1,11	NS
Potássio (g kg⁻¹)			C.V. = 15,92
Doses de Cd (Cd)	4	1,21	NS
Espécies (E)	1	3,00	NS
Cd X E	4	1,48	NS

TABELA 10A. Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cd

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Cádmio (mg kg⁻¹)			C.V. = 34,78
Doses de Cd (Cd)	4	34,50	0,01
Espécies (E)	1	5,28	0,05
Cd X E	4	1,01	NS
Cobre (mg kg⁻¹)			C.V. = 30,75
Doses de Cd (Cd)	4	16,30	0,01
Espécies (E)	1	4,88	0,05
Cd X E	4	4,40	0,01
Zinco (mg kg⁻¹)			C.V. = 32,86
Doses de Cd (Cd)	4	2,96	0,05
Espécies (E)	1	8,86	0,01
Cd X E	4	2,25	NS
Manganês (mg kg⁻¹)			C.V. = 37,67
Doses de Cd (Cd)	4	12,89	0,01
Espécies (E)	1	2,06	NS
Cd X E	4	5,71	0,01
Ferro (mg kg⁻¹)			C.V. = 46,25
Doses de Cd (Cd)	4	22,37	0,01
Espécies (E)	1	5,98	0,05
Cd X E	4	4,47	0,01
Magnésio (g kg⁻¹)			C.V. = 19,97
Doses de Cd (Cd)	4	8,11	0,01
Espécies (E)	1	19,63	0,01
Cd X E	4	1,27	NS
Cálcio (g kg⁻¹)			C.V. = 21,11
Doses de Cd (Cd)	4	9,19	0,01
Espécies (E)	1	6,85	0,05
Cd X E	4	3,58	0,05
Fósforo (g kg⁻¹)			C.V. = 12,69
Doses de Cd (Cd)	4	8,13	0,01
Espécies (E)	1	56,85	0,01
Cd X E	4	1,80	NS
Enxofre (g kg⁻¹)			C.V. = 12,53
Doses de Cd (Cd)	4	54,94	0,01
Espécies (E)	1	23,79	0,01
Cd X E	4	2,04	NS
Potássio (g kg⁻¹)			C.V. = 29,99
Doses de Cd (Cd)	4	8,81	0,01
Espécies (E)	1	1,52	NS
Cd X E	4	1,21	NS

TABELA 11A. Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Pb

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Chumbo (mg kg⁻¹)			C.V. = 26,75
Doses de Pb (Pb)	4	54,11	0,01
Espécies (E)	1	1,38	NS
Pb X E	4	2,42	NS
Cobre (mg kg⁻¹)			C.V. = 25,50
Doses de Pb (Pb)	4	1,26	NS
Espécies (E)	1	6,32	0,05
Pb X E	4	6,69	0,01
Zinco (mg kg⁻¹)			C.V. = 11,89
Doses de Pb (Pb)	4	6,36	0,01
Espécies (E)	1	4,16	NS
Pb X E	4	0,95	NS
Manganês (mg kg⁻¹)			C.V. = 22,28
Doses de Pb (Pb)	4	10,79	0,01
Espécies (E)	1	27,76	0,01
Pb X E	4	1,35	NS
Ferro (mg kg⁻¹)			C.V. = 16,14
Doses de Pb (Pb)	4	5,77	0,01
Espécies (E)	1	3,35	NS
Pb X E	4	0,81	NS
Magnésio (g kg⁻¹)			C.V. = 13,52
Doses de Pb (Pb)	4	2,12	NS
Espécies (E)	1	8,97	0,01
Pb X E	4	1,13	NS
Cálcio (g kg⁻¹)			C.V. = 18,89
Doses de Pb (Pb)	4	5,15	0,01
Espécies (E)	1	42,38	0,01
Pb X E	4	3,32	0,05
Fósforo (g kg⁻¹)			C.V. = 25,02
Doses de Pb (Pb)	4	3,80	0,05
Espécies (E)	1	0,33	NS
Pb X E	4	1,75	NS
Enxofre (g kg⁻¹)			C.V. = 31,00
Doses de Pb (Pb)	4	3,36	0,05
Espécies (E)	1	2,18	NS
Pb X E	4	1,87	NS
Potássio (g kg⁻¹)			C.V. = 41,19
Doses de Pb (Pb)	4	0,53	NS
Espécies (E)	1	0,45	NS
Pb X E	4	0,41	NS

TABELA 12A. Resumo da ANAVA para a concentração de nutrientes e metais pesados determinados na raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Pb

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Chumbo (mg kg⁻¹)			C.V. = 28,66
Doses de Pb (Pb)	4	94,01	0,01
Espécies (E)	1	16,59	0,01
Pb X E	4	21,01	0,01
Cobre (mg kg⁻¹)			C.V. = 34,83
Doses de Pb (Pb)	4	2,73	NS
Espécies (E)	1	0,83	NS
Pb X E	4	0,94	NS
Zinco (mg kg⁻¹)			C.V. = 23,24
Doses de Pb (Pb)	4	0,39	NS
Espécies (E)	1	14,29	0,01
Pb X E	4	1,46	NS
Manganês (mg kg⁻¹)			C.V. = 62,12
Doses de Pb (Pb)	4	2,67	NS
Espécies (E)	1	0,16	NS
Pb X E	4	1,05	NS
Ferro (mg kg⁻¹)			C.V. = 52,84
Doses de Pb (Pb)	4	12,44	0,01
Espécies (E)	1	24,47	0,01
Pb X E	4	4,23	0,01
Magnésio (g kg⁻¹)			C.V. = 19,06
Doses de Pb (Pb)	4	25,08	0,01
Espécies (E)	1	48,56	0,01
Pb X E	4	4,02	0,05
Cálcio (g kg⁻¹)			C.V. = 17,90
Doses de Pb (Pb)	4	15,62	0,01
Espécies (E)	1	0,35	NS
Pb X E	4	1,86	NS
Fósforo (g kg⁻¹)			C.V. = 43,68
Doses de Pb (Pb)	4	12,90	0,01
Espécies (E)	1	3,26	NS
Pb X E	4	3,30	0,05
Enxofre (g kg⁻¹)			C.V. = 38,23
Doses de Pb (Pb)	4	13,40	0,01
Espécies (E)	1	4,21	0,05
Pb X E	4	0,96	NS
Potássio (g kg⁻¹)			C.V. = 22,28
Doses de Pb (Pb)	4	1,57	NS
Espécies (E)	1	1,15	NS
Pb X E	4	2,01	NS

TABELA 13A. Equações de regressão para determinação dos níveis críticos de toxidez de Zn, Cu, Cd e Pb em *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla*

		<i>Eucalyptus maculata</i>			
		Equação	R ²	P ≤	Metal
Mat. Seca Parte Aérea		$Y=99,38-0,0057X^{1,5}+0,0001127X^2$	0,9966	0,01	Zn
		$Y=7,89+92,54 \exp (-X/27,67)$	0,9949	0,01	Cu
		$Y=99,68-6,25X^{1/2}$	0,9940	0,01	Cd
		$Y=97,69-0,42X+0,000635X^2$	0,9864	0,01	Pb
Mat. Seca Raízes		$Y=4,18+95,48 \exp (-X/377,90)$	0,9995	0,01	Zn
		$Y=4,30+96,52 \exp (-X/36,96)$	0,9929	0,01	Cu
		$Y=9,28+90,51 \exp (-X/78,57)$	0,9990	0,01	Cd
		$Y=96,91-3,36X^{1/2}$	0,8972	0,01	Pb
		<i>Eucalyptus urophylla</i>			
		Equação	R ²	P ≤	Metal
Mat. Seca Parte Aérea		$Y=100,48-0,1688X+0,00295X^{1,5}$	0,9941	0,01	Zn
		$Y=-0,93+106,64 \exp (-X/52,03)$	0,8743	0,01	Cu
		$Y=98,05-6,51X^{1/2}$	0,9945	0,01	Cd
		$Y=99,76-0,061X^{1,5}+0,0025X^2$	0,9891	0,01	Pb
Mat. Seca Raízes		$Y=5,99+94,24 \exp (-X/359,57)$	0,9970	0,01	Zn
		$Y=112,6-2,13X+0,11X^{1,5}$	0,7961	0,01	Cu
		$Y=4,11+95,28 \exp (-X/61,23)$	0,9953	0,01	Cd
		$Y=112,16-0,0024X^2+0,0000046X^3$	0,9081	0,01	Pb

TABELA 14A. Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Zn

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Cobre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 39,87
Doses de Zn	4	7,81	0,01
Espécies (E)	1	34,57	0,01
Zn X E	4	8,20	0,01
Zinco (mg vaso⁻¹)			C.V. = 42,63
Doses de Zn	4	35,06	0,01
Espécies (E)	1	1,39	NS
Zn X E	4	0,93	NS
Manganês (mg vaso⁻¹)			C.V. = 26,38
Doses de Zn	4	177,33	0,01
Espécies (E)	1	1,08	NS
Zn X E	4	2,62	NS
Ferro (mg vaso⁻¹)			C.V. = 34,10
Doses de Zn	4	84,31	0,01
Espécies (E)	1	11,65	0,01
Zn X E	4	3,27	0,05
Magnésio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 33,13
Doses de Zn	4	68,14	0,01
Espécies (E)	1	0,77	NS
Zn X E	4	0,86	NS
Cálcio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 34,72
Doses de Zn	4	51,95	0,01
Espécies (E)	1	2,21	NS
Zn X E	4	1,66	NS
Fósforo (mg vaso⁻¹)			C.V. = 29,74
Doses de Zn	4	20,63	0,01
Espécies (E)	1	3,54	NS
Zn X E	4	0,36	NS
Enxofre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 24,43
Doses de Zn	4	71,90	0,01
Espécies (E)	1	0,08	NS
Zn X E	4	0,47	NS
Potássio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 23,92
Doses de Zn	4	63,83	0,01
Espécies (E)	1	7,49	0,05
Zn X E	4	6,43	0,01

TABELA 15A. Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Zn

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Cobre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 49,57
Doses de Zn	4	22,78	0,01
Espécies (E)	1	0,01	NS
Zn X E	4	17,47	0,01
Zinco (mg vaso⁻¹)			C.V. = 86,23
Doses de Zn	4	8,47	0,01
Espécies (E)	1	2,83	NS
Zn X E	4	1,20	NS
Manganês (mg vaso⁻¹)			C.V. = 77,00
Doses de Zn	4	35,61	0,01
Espécies (E)	1	2,41	NS
Zn X E	4	2,72	NS
Ferro (mg vaso⁻¹)			C.V. = 32,02
Doses de Zn	4	8,07	0,01
Espécies (E)	1	0,05	NS
Zn X E	4	2,15	NS
Magnésio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 53,67
Doses de Zn	4	74,20	0,01
Espécies (E)	1	5,95	0,05
Zn X E	4	4,32	0,01
Cálcio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 42,53
Doses de Zn	4	76,26	0,01
Espécies (E)	1	0,83	NS
Zn X E	4	2,62	NS
Fósforo (mg vaso⁻¹)			C.V. = 24,96
Doses de Zn	4	89,91	0,01
Espécies (E)	1	0,12	NS
Zn X E	4	0,84	NS
Enxofre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 39,38
Doses de Zn	4	62,13	0,01
Espécies (E)	1	9,40	0,01
Zn X E	4	4,30	0,01
Potássio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 55,96
Doses de Zn	4	48,96	0,01
Espécies (E)	1	0,04	NS
Zn X E	4	0,67	NS

TABELA 16A. Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cu

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Cobre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 36,09
Doses de Cu (Cu)	4	45,65	0,01
Espécies (E)	1	0,12	NS
Cu X E	4	1,35	NS
Zinco (mg vaso⁻¹)			C.V. = 21,79
Doses de Cu (Cu)	4	171,56	0,01
Espécies (E)	1	4,95	0,05
Cu X E	4	19,79	0,01
Manganês (mg vaso⁻¹)			C.V. = 24,70
Doses de Cu (Cu)	4	121,64	0,01
Espécies (E)	1	12,34	0,01
Cu X E	4	15,06	0,01
Ferro (mg vaso⁻¹)			C.V. = 48,39
Doses de Cu (Cu)	4	31,83	0,01
Espécies (E)	1	17,02	0,01
Cu X E	4	5,51	0,01
Magnésio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 30,81
Doses de Cu (Cu)	4	79,87	0,01
Espécies (E)	1	7,16	0,05
Cu X E	4	5,93	0,01
Cálcio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 38,39
Doses de Cu (Cu)	4	57,52	0,01
Espécies (E)	1	4,81	0,05
Cu X E	4	4,41	0,01
Fósforo (mg vaso⁻¹)			C.V. = 20,60
Doses de Cu (Cu)	4	67,72	0,01
Espécies (E)	1	2,58	NS
Cu X E	4	0,70	NS
Enxofre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 26,37
Doses de Cu (Cu)	4	99,86	0,01
Espécies (E)	1	0,01	NS
Cu X E	4	9,18	0,01
Potássio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 21,79
Doses de Cu (Cu)	4	147,40	0,01
Espécies (E)	1	6,95	0,05
Cu X E	4	13,70	0,01

TABELA 17A. Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cu

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Cobre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 45,83
Doses de Cu (Cu)	4	13,97	0,01
Espécies (E)	1	5,55	0,05
Cu X E	4	1,32	NS
Zinco (mg vaso⁻¹)			C.V. = 36,76
Doses de Cu (Cu)	4	115,31	0,01
Espécies (E)	1	7,02	0,05
Cu X E	4	36,07	0,01
Manganês (mg vaso⁻¹)			C.V. = 45,35
Doses de Cu (Cu)	4	66,70	0,01
Espécies (E)	1	9,88	0,01
Cu X E	4	5,90	0,01
Ferro (mg vaso⁻¹)			C.V. = 37,29
Doses de Cu (Cu)	4	19,69	0,01
Espécies (E)	1	24,64	0,01
Cu X E	4	5,82	0,01
Magnésio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 34,81
Doses de Cu (Cu)	4	112,56	0,01
Espécies (E)	1	42,89	0,01
Cu X E	4	23,40	0,01
Cálcio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 36,03
Doses de Cu (Cu)	4	78,89	0,01
Espécies (E)	1	22,63	0,01
Cu X E	4	14,88	0,01
Fósforo (mg vaso⁻¹)			C.V. = 24,62
Doses de Cu (Cu)	4	68,23	0,01
Espécies (E)	1	0,17	NS
Cu X E	4	4,14	0,01
Enxofre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 27,53
Doses de Cu (Cu)	4	129,44	0,01
Espécies (E)	1	0,72	NS
Cu X E	4	8,89	0,01
Potássio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 45,04
Doses de Cu (Cu)	4	61,61	0,01
Espécies (E)	1	0,54	NS
Cu X E	4	4,13	0,01

TABELA 18A. Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cd

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Cádmio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 50,61
Doses de Cd (Cd)	4	10,62	0,01
Espécies (E)	1	0,09	NS
Cd X E	4	0,15	NS
Cobre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 41,49
Doses de Cd (Cd)	4	43,86	0,01
Espécies (E)	1	3,41	NS
Cd X E	4	0,52	NS
Zinco (mg vaso⁻¹)			C.V. = 26,28
Doses de Cd (Cd)	4	107,05	0,01
Espécies (E)	1	13,02	0,01
Cd X E	4	7,85	0,01
Manganês (mg vaso⁻¹)			C.V. = 27,43
Doses de Cd (Cd)	4	150,21	0,01
Espécies (E)	1	1,41	NS
Cd X E	4	0,83	NS
Ferro (mg vaso⁻¹)			C.V. = 42,10
Doses de Cd (Cd)	4	25,80	0,01
Espécies (E)	1	0,01	NS
Cd X E	4	0,16	NS
Magnésio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 23,28
Doses de Cd (Cd)	4	104,95	0,01
Espécies (E)	1	0,52	NS
Cd X E	4	1,26	NS
Cálcio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 27,58
Doses de Cd (Cd)	4	82,59	0,01
Espécies (E)	1	15,46	0,01
Cd X E	4	5,18	0,01
Fósforo (mg vaso⁻¹)			C.V. = 23,07
Doses de Cd (Cd)	4	17,64	0,01
Espécies (E)	1	4,51	0,05
Cd X E	4	0,37	NS
Enxofre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 30,75
Doses de Cd (Cd)	4	32,39	0,01
Espécies (E)	1	3,88	NS
Cd X E	4	1,18	NS
Potássio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 24,77
Doses de Cd (Cd)	4	73,58	0,01
Espécies (E)	1	0,01	NS
Cd X E	4	0,09	NS

TABELA 19A. Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cd

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Cádmio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 42,97
Doses de Cd (Cd)	4	17,93	0,01
Espécies (E)	1	0,80	NS
Cd X E	4	1,67	NS
Cobre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 31,49
Doses de Cd (Cd)	4	12,14	0,01
Espécies (E)	1	0,43	NS
Cd X E	4	3,64	0,05
Zinco (mg vaso⁻¹)			C.V. = 47,38
Doses de Cd (Cd)	4	40,30	0,01
Espécies (E)	1	3,26	NS
Cd X E	4	0,97	NS
Manganês (mg vaso⁻¹)			C.V. = 62,31
Doses de Cd (Cd)	4	36,38	0,01
Espécies (E)	1	1,50	NS
Cd X E	4	2,30	NS
Ferro (mg vaso⁻¹)			C.V. = 25,79
Doses de Cd (Cd)	4	3,02	0,05
Espécies (E)	1	3,08	NS
Cd X E	4	3,20	0,05
Magnésio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 31,56
Doses de Cd (Cd)	4	80,92	0,01
Espécies (E)	1	16,38	0,01
Cd X E	4	6,21	0,01
Cálcio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 27,18
Doses de Cd (Cd)	4	50,08	0,01
Espécies (E)	1	2,72	NS
Cd X E	4	1,94	NS
Fósforo (mg vaso⁻¹)			C.V. = 23,00
Doses de Cd (Cd)	4	17,33	0,01
Espécies (E)	1	0,35	NS
Cd X E	4	2,24	NS
Enxofre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 34,53
Doses de Cd (Cd)	4	14,56	0,01
Espécies (E)	1	3,24	NS
Cd X E	4	1,68	NS
Potássio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 30,80
Doses de Cd (Cd)	4	70,23	0,01
Espécies (E)	1	5,47	0,05
Cd X E	4	2,47	NS

TABELA 20A. Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da parte aérea, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Pb

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Chumbo (mg vaso⁻¹)			C.V. = 72,21
Doses de Pb (Pb)	4	15,23	0,01
Espécies (E)	1	0,25	NS
Pb X E	4	4,13	0,01
Cobre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 49,42
Doses de Pb (Pb)	4	22,20	0,01
Espécies (E)	1	0,01	NS
Pb X E	4	2,57	NS
Zinco (mg vaso⁻¹)			C.V. = 35,09
Doses de Pb (Pb)	4	30,07	0,01
Espécies (E)	1	0,09	NS
Pb X E	4	2,30	NS
Manganês (mg vaso⁻¹)			C.V. = 30,21
Doses de Pb (Pb)	4	80,51	0,01
Espécies (E)	1	4,90	0,05
Pb X E	4	4,43	0,01
Ferro (mg vaso⁻¹)			C.V. = 30,86
Doses de Pb (Pb)	4	44,51	0,01
Espécies (E)	1	0,01	NS
Pb X E	4	3,67	0,05
Magnésio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 32,23
Doses de Pb (Pb)	4	44,44	0,01
Espécies (E)	1	0,07	NS
Pb X E	4	2,95	0,05
Cálcio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 41,10
Doses de Pb (Pb)	4	34,25	0,01
Espécies (E)	1	3,39	NS
Pb X E	4	2,75	0,05
Fósforo (mg vaso⁻¹)			C.V. = 28,50
Doses de Pb (Pb)	4	41,68	0,01
Espécies (E)	1	9,74	0,01
Pb X E	4	0,60	NS
Enxofre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 46,81
Doses de Pb (Pb)	4	27,63	0,01
Espécies (E)	1	0,04	NS
Pb X E	4	0,83	NS
Potássio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 63,30
Doses de Pb (Pb)	4	10,43	0,01
Espécies (E)	1	0,01	NS
Pb X E	4	1,01	NS

TABELA 21A. Resumo da ANAVA para o acúmulo de nutrientes e metais pesados na matéria seca da raiz, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Pb

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Chumbo (mg vaso⁻¹)			C.V. = 61,31
Doses de Pb (Pb)	4	9,44	0,01
Espécies (E)	1	0,46	NS
Pb X E	4	5,71	0,01
Cobre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 41,99
Doses de Pb (Pb)	4	11,76	0,01
Espécies (E)	1	0,23	NS
Pb X E	4	1,38	NS
Zinco (mg vaso⁻¹)			C.V. = 37,89
Doses de Pb (Pb)	4	17,71	0,01
Espécies (E)	1	8,06	0,01
Pb X E	4	5,34	0,01
Manganês (mg vaso⁻¹)			C.V. = 70,80
Doses de Pb (Pb)	4	11,28	0,01
Espécies (E)	1	0,25	NS
Pb X E	4	0,75	NS
Ferro (mg vaso⁻¹)			C.V. = 46,14
Doses de Pb (Pb)	4	4,99	0,01
Espécies (E)	1	12,78	0,01
Pb X E	4	1,16	NS
Magnésio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 49,62
Doses de Pb (Pb)	4	21,77	0,01
Espécies (E)	1	11,16	0,01
Pb X E	4	5,27	0,01
Cálcio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 36,60
Doses de Pb (Pb)	4	38,27	0,01
Espécies (E)	1	0,58	NS
Pb X E	4	3,97	0,05
Fósforo (mg vaso⁻¹)			C.V. = 39,57
Doses de Pb (Pb)	4	3,48	0,05
Espécies (E)	1	0,58	NS
Pb X E	4	0,84	NS
Enxofre (mg vaso⁻¹)			C.V. = 51,24
Doses de Pb (Pb)	4	23,65	0,01
Espécies (E)	1	6,24	0,05
Pb X E	4	6,25	0,01
Potássio (mg vaso⁻¹)			C.V. = 55,25
Doses de Pb (Pb)	4	9,59	0,01
Espécies (E)	1	0,10	NS
Pb X E	4	3,34	0,05

TABELA 22A. Resumo da ANAVA para os índices de translocação (IT) de nutrientes e metais pesados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Zn

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Zinco (%)			C.V. = 16,50
Doses de Zn (Zn)	4	3,93	0,05
Espécies (E)	1	1,82	NS
Zn X E	4	0,87	NS
Cobre (%)			C.V. = 18,01
Doses de Zn (Zn)	4	18,08	0,01
Espécies (E)	1	116,44	0,01
Zn X E	4	33,42	0,01
Manganês (%)			C.V. = 3,45
Doses de Zn (Zn)	4	8,73	0,01
Espécies (E)	1	0,61	NS
Zn X E	4	4,18	0,01
Ferro (%)			C.V. = 41,78
Doses de Zn (Zn)	4	48,46	0,01
Espécies (E)	1	3,84	NS
Zn X E	4	1,23	NS
Magnésio (%)			C.V. = 4,02
Doses de Zn (Zn)	4	70,47	0,01
Espécies (E)	1	6,28	0,05
Zn X E	4	0,93	NS
Cálcio (%)			C.V. = 3,96
Doses de Zn (Zn)	4	27,91	0,01
Espécies (E)	1	2,52	NS
Zn X E	4	0,47	NS
Fósforo (%)			C.V. = 10,10
Doses de Zn (Zn)	4	12,54	0,01
Espécies (E)	1	5,65	0,05
Zn X E	4	0,85	NS
Enxofre (%)			C.V. = 5,34
Doses de Zn (Zn)	4	25,98	0,01
Espécies (E)	1	34,02	0,01
Zn X E	4	5,95	0,01
Potássio (%)			C.V. = 5,07
Doses de Zn (Zn)	4	58,31	0,01
Espécies (E)	1	0,08	NS
Zn X E	4	6,49	0,01

TABELA 23A. Resumo da ANAVA para os índices de translocação (IT) de nutrientes e metais pesados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cu

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Cobre (%)			C.V. = 28,10
Doses de Cu (Cu)	4	63,96	0,01
Espécies (E)	1	6,54	0,05
Cu X E	4	1,78	NS
Zinco (%)			C.V. = 11,98
Doses de Cu (Cu)	4	38,21	0,01
Espécies (E)	1	0,22	NS
Cu X E	4	3,79	0,05
Manganês (%)			C.V. = 2,94
Doses de Cu (Cu)	4	15,73	0,01
Espécies (E)	1	0,16	NS
Cu X E	4	0,37	NS
Ferro (%)			C.V. = 36,65
Doses de Cu (Cu)	4	9,13	0,01
Espécies (E)	1	0,37	NS
Cu X E	4	1,38	NS
Magnésio (%)			C.V. = 6,19
Doses de Cu (Cu)	4	53,42	0,01
Espécies (E)	1	8,06	0,01
Cu X E	4	6,16	0,01
Cálcio (%)			C.V. = 7,24
Doses de Cu (Cu)	4	15,23	0,01
Espécies (E)	1	0,58	NS
Cu X E	4	3,04	0,05
Fósforo (%)			C.V. = 5,69
Doses de Cu (Cu)	4	13,38	0,01
Espécies (E)	1	0,17	NS
Cu X E	4	7,10	0,01
Enxofre (%)			C.V. = 7,76
Doses de Cu (Cu)	4	15,48	0,01
Espécies (E)	1	4,70	0,05
Cu X E	4	2,07	NS
Potássio (%)			C.V. = 5,56
Doses de Cu (Cu)	4	28,40	0,01
Espécies (E)	1	7,06	0,05
Cu X E	4	1,22	NS

TABELA 24A. Resumo da ANAVA para os índices de translocação (IT) de nutrientes e metais pesados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Cd

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Cádmio (%)			C.V. = 33,80
Doses de Cd (Cd)	4	13,71	0,01
Espécies (E)	1	3,88	NS
Cd X E	4	3,57	0,05
Cobre (%)			C.V. = 23,05
Doses de Cd (Cd)	4	57,95	0,01
Espécies (E)	1	10,63	0,01
Cd X E	4	4,11	0,05
Zinco (%)			C.V. = 17,50
Doses de Cd (Cd)	4	1,29	NS
Espécies (E)	1	24,90	0,01
Cd X E	4	2,26	NS
Manganês (%)			C.V. = 2,95
Doses de Cd (Cd)	4	5,52	0,01
Espécies (E)	1	2,90	NS
Cd X E	4	5,43	0,01
Ferro (%)			C.V. = 27,58
Doses de Cd (Cd)	4	20,74	0,01
Espécies (E)	1	2,50	NS
Cd X E	4	0,90	NS
Magnésio (%)			C.V. = 6,36
Doses de Cd (Cd)	4	8,75	0,01
Espécies (E)	1	10,30	0,01
Cd X E	4	2,09	NS
Cálcio (%)			C.V. = 5,21
Doses de Cd (Cd)	4	4,18	0,01
Espécies (E)	1	5,06	0,05
Cd X E	4	1,66	NS
Fósforo (%)			C.V. = 6,29
Doses de Cd (Cd)	4	1,39	NS
Espécies (E)	1	0,77	NS
Cd X E	4	1,92	NS
Enxofre (%)			C.V. = 11,46
Doses de Cd (Cd)	4	6,07	0,01
Espécies (E)	1	1,68	NS
Cd X E	4	1,92	NS
Potássio (%)			C.V. = 7,13
Doses de Cd (Cd)	4	6,43	0,01
Espécies (E)	1	0,12	NS
Cd X E	4	2,26	NS

TABELA 25A. Resumo da ANAVA para os índices de translocação (IT) de nutrientes e metais pesados, considerando-se as espécies de eucalipto e doses de Pb

Variáveis	G.L.	Valor F	P ≤
Chumbo (%)			C.V. = 55,03
Doses de Pb (Pb)	4	14,00	0,01
Espécies (E)	1	8,24	0,01
Pb X E	4	4,62	0,01
Cobre (%)			C.V. = 18,73
Doses de Pb (Pb)	4	11,55	0,01
Espécies (E)	1	0,14	NS
Pb X E	4	1,65	NS
Zinco (%)			C.V. = 6,75
Doses de Pb (Pb)	4	3,88	0,05
Espécies (E)	1	14,96	0,01
Pb X E	4	1,03	NS
Manganês (%)			C.V. = 3,20
Doses de Pb (Pb)	4	5,82	0,01
Espécies (E)	1	1,68	NS
Pb X E	4	0,53	NS
Ferro (%)			C.V. = 38,83
Doses de Pb (Pb)	4	6,22	0,01
Espécies (E)	1	16,80	0,01
Pb X E	4	1,78	NS
Magnésio (%)			C.V. = 5,97
Doses de Pb (Pb)	4	5,16	0,01
Espécies (E)	1	14,54	0,01
Pb X E	4	1,98	NS
Cálcio (%)			C.V. = 7,23
Doses de Pb (Pb)	4	1,06	NS
Espécies (E)	1	8,08	0,01
Pb X E	4	1,68	NS
Fósforo (%)			C.V. = 16,84
Doses de Pb (Pb)	4	11,41	0,01
Espécies (E)	1	5,76	0,05
Pb X E	4	0,45	NS
Enxofre (%)			C.V. = 12,15
Doses de Pb (Pb)	4	9,81	0,01
Espécies (E)	1	4,00	NS
Pb X E	4	1,67	NS
Potássio (%)			C.V. = 10,94
Doses de Pb (Pb)	4	0,81	NS
Espécies (E)	1	1,45	NS
Pb X E	4	1,71	NS

TABELA 26A. Efeito das doses de Zn, Cu, Cd e Pb na concentração de metais pesados e nutrientes na parte aérea de *E. maculata* (MAC) e *E. urophylla* (URO)

Metal Estudado/Espécie	Zn	Cu	Cd	Pb	Fe	Mn	P	K	S	Ca	Mg	
Zn	MAC	+++	0	n.a.	n.a.	---	---	++	0	---	---	---
	URO	+++	++	n.a.	n.a.	---	---	++	0	0	--	---
Cu	MAC	++	+++	n.a.	n.a.	+	+	+++	+++	++	++	++
	URO	+++	+++	n.a.	n.a.	+	+	+++	+++	+++	++	++
Cd	MAC	--	-	+++	n.a.	-	---	+++	0	0	--	-
	URO	0	-	+++	n.a.	-	---	+++	0	0	--	-
Pb	MAC	+	-	n.a.	+++	-	--	+	0	--	-	0
	URO	+	+	n.a.	+++	-	--	+	0	--	+	0

- diminui; + aumenta; 0 sem efeito; n.a. não se aplica