



Desempenho de duas espécies de eucalipto em solo com elevados teores de Mn

**Marcio O. L. Magalhães¹, Nelson M. B. do Amaral Sobrinho²,
Nelson Mazur², Hugo M. Machado³ & Jesus Sampaio Júnior³**

RESUMO

Atualmente, é considerável o interesse no desenvolvimento de estratégias que sejam eficientes e duráveis na remediação de solos contaminados com metais pesados. Objetivou-se, com este trabalho, avaliar o desenvolvimento de duas espécies *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus saligna*, cultivadas em substrato contaminado com Mn coletado em área próxima ao Porto de Itaguaí e ao local de disposição de resíduo perigoso da Cia Mercantil e Industrial Ingá em Itaguaí, RJ. O substrato foi tratado com dois resíduos industriais, um com característica alcalina (escória de aciaria) e outro com alto teor de óxido de ferro (carepa de laminação). Verificou-se que o substrato não tratado apresentava alto teor de Mn nas frações fitodisponíveis, valores esses tóxicos para as espécies estudadas. Os tratamentos causaram redução nas concentrações de Mn em solução e trocável (frações fitodisponíveis) e aumento nas fases mais estáveis. A menor dose de Escória de Aciaria foi suficiente para que ocorresse diminuição nas concentrações de Mn em solução, sendo este efeito evidenciado pelo desenvolvimento das plantas e na maior dose de Escória de Aciaria o crescimento das espécies estudadas foi maior. O *Eucalyptus urophylla* apresentou maior desenvolvimento e maior extração deste elemento.

Palavras chave: fitorremediação, árvores, metais pesados

Performance of two eucalyptus species in soil with high levels of Mn

ABSTRACT

Currently, there is considerable interest in developing strategies that are efficient and durable in the remediation of soils contaminated with heavy metals. This study aimed to evaluate the development of *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus saligna* grown in contaminated substrate with Mn collected in the area near the Port of Itaguaí and location of disposal of hazardous waste of Cia Mercantil and Industrial Inga in Itaguaí. The substrate was treated with two industrial waste, with a characteristic alkaline (slag of melt shop) and another with high content of iron oxide (lamination of scale). It was found that the untreated substrate, had a high content of Mn in fractions phytoavailable, being these values toxic to the species. The treatments caused a reduction in the concentrations of Mn in solution and exchangeable (fractions phytoavailable) and increase in more stable phases. The lowest dose of slag of melt shop was enough to decrease the concentrations of Mn in solution, and this effect is evidenced by the development of plants and in the higher dose of slag of melt shop the growth of studied species was more. *Eucalyptus urophylla* showed greater development and greater extraction of this element.

Key words: phytoremediation, trees, heavy metals

¹ Doutorando do Departamento de Solos/UFRRJ. E-mail: marciomagalhaes@gmail.com

² Departamento de Solos/UFRRJ, BR 465, km 7, CEP 23890 000, Seropédica, RJ. E-mail: nelmoura@ufrj.br; nelmazur@ufrj.br

³ Mestrando do CPGA CS, Departamento de Solos/UFRRJ. E-mail: hugomaia84@gmail.com; juninho.agro@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

Tem-se verificado, nos últimos anos, grande preocupação com substâncias contaminantes lançadas no meio ambiente, sobretudo no solo, devido ao aumento nas emissões desses poluentes, em consequência das atividades antrópicas (Ives & Cardinale, 2004; Giachetti & Sebastiani, 2006). Dentre essas substâncias os metais pesados são importantes devido à sua periculosidade e toxicidade aos organismos (Hsu et al., 2006), além de não desaparecerem do ambiente com os processos físicos, químicos e biológicos mantendo se, assim, por muitos anos nos solos (Mulligan et al., 2001; Kasassi et al., 2008).

O Mn é um dos micronutrientes para as plantas; entretanto, em concentrações elevadas pode tornar-se tóxico e afetar o crescimento das espécies vegetais (Kumar et al., 1995). Os metais pesados podem ser imobilizados por plantas, através da absorção e acumulação nas raízes, adsorção radicular ou precipitação na rizosfera (Wong, 2003).

Algumas espécies de árvores foram testadas quanto à capacidade de crescerem em solo contaminado com metais pesados, dentre elas o *Eucalyptus torelliana*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus camaldulensis*, que se mostraram capazes de tolerar esta condição de estresse (Soares et al., 2001).

Por apresentarem características de crescimento rápido, possuir sistema radicular desenvolvido e facilidade de adaptação a condições estressantes (Magalhães et al., 2011), espécies de Eucalipto possuem potencial para serem empregadas em programas de recuperação de áreas contaminadas pela deposição de metais pesados, além de aumentar o estoque de carbono do solo (Soares et al., 2005; Paixão et al., 2006).

Objetivou-se avaliar, através deste trabalho, o desenvolvimento das espécies *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus saligna* em solos com altos teores de Mn e tratados com dois resíduos inertizantes.

MATERIAL E MÉTODOS

O substrato utilizado foi proveniente de escavações do solo localizado próximo ao porto de Itaguaí, na Baía de Sepetiba, Itaguaí, RJ, influenciado pelo aterro de resíduos perigosos gerados pela Cia Mercantil e Industrial Ingá, considerada uma das maiores poluidoras do Estado do Rio de Janeiro. Este substrato foi misturado com aterro de diferentes procedências, despejado sob solo de mangue e/ou fundo de baía, com alto teor de sódio e grau de tiomorfismo, além de ter sido utilizado, em passado recente, como unidade de pátio de estocagem do Porto de Itaguaí, RJ.

As amostras dos resíduos foram coletadas segundo a Norma NBR 10.007 (ABNT, 2004), após o que foram secadas ao ar,

destorroadas e homogeneizadas. Para determinação das concentrações pseudototais de Mn, as amostras foram trituradas em almofariz de ágata e novamente peneiradas, utilizando-se uma peneira de malha de nylon, com abertura de 210 μ m e realizada a extração com água régia (ISO, 1995). O valor de pH (1:2,5) e as concentrações de Ca, Mg, K, P, Na e Al foram determinados pelo método proposto pela EMBRAPA (1997) e apresentados na Tabela 1.

Com o objetivo de realizar a imobilização química do Mn e promover o desenvolvimento das plantas de *Eucalyptus* no substrato contaminado, utilizaram-se, como inertizantes, dois resíduos gerados pela Companhia Siderúrgica Nacional - CSN, um com característica alcalina, escória de aciaria (pH 12,3, 41,87% de CaO, 4,63% de MgO, 35,54% de SiO₂ e 7,67% de umidade) e outro com alto teor de óxido de ferro como adsorvente, carepa de laminação (pH 8,60 e 76,44% de Fe); posteriormente e para se definir a proporção adequada do resíduo inertizante alcalino (escória de aciaria), realizou-se um ensaio de curva de neutralização que consistiu em se adicionar, ao solo, quantidades crescentes de Escória de Aciaria, na proporção de: 1; 2; 3; 4; 5 e 6% do resíduo alcalino. Esta mistura permaneceu incubada a 70% da capacidade de campo, durante 7 dias, até a estabilização do pH. Verificou se, para atingir os valores de pH 6 e 7, que era necessário adicionar as doses de 4 e 6% de Escória de Aciaria, respectivamente. Para avaliar o potencial do resíduo Carepa de Laminação na adsorção de Mn, foi construída uma isoterma de adsorção utilizando se o modelo de Langmuir e determinando o valor de adsorção máxima para Mn, que foi de 364,5 mg kg⁻¹. Em função deste valor se definiu a dose de 1% para o resíduo Carepa de Laminação.

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no Campus da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), no município de Seropédica, RJ (22° 47' de latitude sul e 43° 40' de longitude oeste).

A instalação das unidades experimentais seguiu o delineamento inteiramente casualizado composto de 3 tratamentos, cultivo de 2 espécies de eucalipto e com 4 repetições totalizando 24 unidades experimentais.

O substrato e os inertizantes utilizados no experimento foram secados ao ar, destorroados, peneirados em tamis de malha de 4,5 mm e cada resíduo foi homogeneizado separadamente.

As unidades experimentais utilizadas foram: T1 Substrato (testemunha), T2 Substrato + 4% EA + 1% CL e T3 Substrato + 6% EA + 1% CL, E. A (escória de aciaria) e CL (carepa de laminação).

Obtiveram-se as mudas de eucalipto no Instituto de Floresta da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, com idade aproximada de 120 dias e as espécies utilizadas foram *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus saligna*.

Os inertizantes foram misturados ao substrato, dentro de sacos, para que ocorresse sua homogeneização e em seguida

Tabela 1. Características químicas e teor de argila da amostra do substrato utilizado no experimento

Na	Ca	Mg	K	H+Al	Al	S	T	V	Mn ¹	pH	C _{org}	P	Arg.
cmol _c dm ⁻³								%	mg kg ⁻¹		g kg ⁻¹	mg dm ⁻³	%
7,8	15,8	6,2	0,4	7,4	2,6	30,2	37,6	80	867,7 ²	4,4	23,9	26	31

¹ Extraído com Água Régia (HCl:HNO₃, 1:3)

transferidos para vasos de 5 L, incubados a 70% da capacidade de campo, durante 10 dias; após este período fez-se o transplante das mudas que permaneceram em casa de vegetação 225 dias após o plantio, sendo a idade das plantas, no final do experimento, de aproximadamente um ano.

As concentrações de nutrientes adicionados ao substrato foram determinadas após a obtenção dos resultados da sua análise química (Tabela 1) e conduzidas com fertirrigação, utilizando-se solução nutritiva de Hoagland & Arnon (1950) n.2 a ¼ de força iônica, na frequência de duas vezes por semana e se irrigando nos outros dias apenas com água destilada e deionizada mantendo as a 70% da capacidade de campo.

Os valores de pH no substrato e nos tratamentos foram determinados pelo método da EMBRAPA (1997). O método usado para o fracionamento geoquímico do Mn foi o utilizado no trabalho de Santos et al., (2007) que consiste em extrações simples, utilizando-se as seguintes soluções extratoras: água; cloreto de magnésio 1 mol L⁻¹; DTPA, e ácido acético 0,043 mol L⁻¹ além de extração com água régia (ISO,1995). Nos extratos obtidos foram determinadas as concentrações de Mn, por espectrofotometria de absorção atômica, através do equipamento VARIAN AA600. Com os resultados obtidos por extrações simples foram definidas, pelas diferenças nas quantidades extraíveis, as prováveis frações químicas de Mn nos tratamentos. As frações químicas definidas foram: F1: extração com água ⇒ fração solúvel em água; F2: extraído com MgCl₂ – extraído com água ⇒ corresponde aos metais ligados eletrostaticamente à superfície do resíduo; F3: extraído com DTPA – extraído com MgCl₂ ⇒ fração associada, predominantemente, à superfície de óxidos de Fe e compostos orgânicos mais estáveis pela formação de complexos de esfera interna; F4: extraído com ácido acético – extraído com MgCl₂ ⇒ fração associada, predominantemente, a precipitados de carbonatos; F5: pseudototal – Σ das frações (F1; F2; F3 e F4) ⇒ fração associada a compostos de Fe com alto grau de cristalinidade (Fração residual).

No final do experimento as plantas foram coletadas, separadas em raiz, caule e folhas e, posteriormente, lavadas em água comum numa primeira lavagem e em seguida água destilada e deionizada; foram deixadas para secagem em temperatura ambiente por um dia e depois secadas em estufa, em temperatura de 70 °C, até atingirem peso constante. Obteve-se o material para digestão após moagem, tanto das folhas como o do caule e das raízes, em moinho tipo Willey com malha de 2 mm.

As concentrações de Mn foram determinadas a partir da digestão nitroperclórica, na proporção de 6:1.

Nos extratos obtidos se determinaram as concentrações de Mn, por espectrofotometria de absorção atômica, empregando-se o equipamento VARIAN AA600. Com base nas concentrações e na produção de matéria seca calcularam-se as quantidades acumuladas de Mn nas raízes, caule e folhas. Por meio da quantidade acumulada calculou-se a porcentagem de acúmulo de Mn para cada parte da planta em relação ao acúmulo total.

Foram efetuadas as seguintes análises estatísticas: Teste de Lilliefors para verificação da normalidade; Teste de Cochran e Bartlett, para verificar a homogeneidade das variâncias, análise de variância e teste de médias Tukey a nível de 5% de

probabilidade. Os dados originais, exceto matéria seca, foram transformados aplicando-se Ln. Todas as análises estatísticas foram feitas por meio do Programa Estatístico SAEG Versão 9.0 (Fundação Arthur Bernardes na UFV, Viçosa, MG).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A concentração pseudototal de Mn (Tabela 1) no substrato estava acima dos valores correspondentes aos considerados normais de Mn em solo, propostos por Fadigas (2006), porém abaixo dos níveis considerados críticos para o desenvolvimento vegetal, conforme proposto por Kabata-Pendias & Pendias (2001). Além dos valores de Mn estarem acima dos valores considerados normais, o pH do substrato é baixo, o que propiciou maior disponibilidade do elemento visto que as plantas cultivadas no T1 morreram aos 30 dias (Tabela 2). Com a adição dos inertizantes e consequente elevação do pH, o Mn passou das formas mais solúveis para formas mais estáveis, diminuindo a fitodisponibilidade (Figura 1).

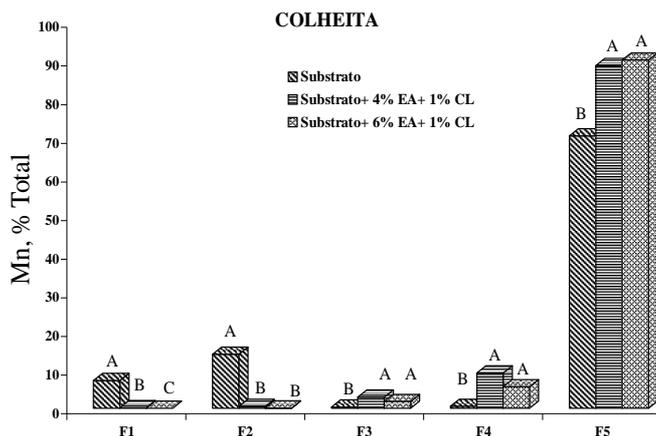
Tabela 2. Matéria seca (g) das folhas, caule, ramo e raiz e volume de raiz (cm³) das espécies de eucaliptos cultivadas em substrato com altos teores de Mn

	Espécie	T1	T2	T3	C.V.
Folha	<i>E. urophylla</i>	0,9 C	28,1 B	34,10 A	4,1
	<i>E. saligna</i>	0,3 C	23,7 B	30,00 A	
Caule	<i>E. urophylla</i>	0,7 aC	18,1 aB	25,40 aA	3,2
	<i>E. saligna</i>	0,6 aC	12,3 bB	16,70 bA	
Ramo	<i>E. urophylla</i>	*	4,8 bA	6,20 bA	5,8
	<i>E. saligna</i>	*	7,7 aA	8,90 aA	
Raiz	<i>E. urophylla</i>	0,5 C	16,0 B	25,60 A	11,9
	<i>E. saligna</i>	0,3 C	15,9 B	20,15 A	
Total	<i>E. urophylla</i>	2,1 aC	67,0 aB	90,20 aA	6,8
	<i>E. saligna</i>	1,2 bC	59,6 bB	75,80 bA	
Vol. Raiz	<i>E. urophylla</i>	*	57,0 B	73,00 A	2,4
	<i>E. saligna</i>	*	57,0 B	89,00 A	

* Plantas que morreram aos 30 dias após o plantio
Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. As letras maiúsculas são comparadas na horizontal, comparando-se os tratamentos e letras minúsculas são comparadas na vertical, comparando as espécies, para cada tratamento e parte vegetal
n.s. – não significativo; C.V. – coeficiente de variação
T1 – Substrato; T2 – Substrato + 4% EA + 1% CL; T3 – Substrato + 6% EA + 1% CL
EA, Escória de Aciaria; CL, Carepa de Laminiação

A Figura 1 mostra que aproximadamente 15% do teor total de Mn estavam sob a forma biodisponível (frações F1 e F2) e, com adição dos inertizantes, houve um decréscimo expressivo, chegando a não ser detectado na forma solúvel (fração F1). As diferentes doses de inertizantes na F1 ocasionaram diferença significativa nas concentrações de Mn, nessa fração geoquímica. O decréscimo nas frações F1 e F2 foi acompanhado do aumento das fases mais estáveis, principalmente na fração F5.

A Figura 2 apresenta a altura do *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus saligna*, em função dos dias após o plantio nos diferentes tratamentos; observa-se que, quando cultivadas no substrato sem adição dos inertizantes, i.e, no tratamento 1, as espécies de eucalipto não resistiram às concentrações biodisponíveis de Mn e morreram aos 30 dias após a implantação do experimento devido, provavelmente, ao baixo



Obs.: Valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. EA, Escória de Aciaria; CL, Carepa de Laminação. F1: extração com água; F2: extraído com $MgCl_2$ extraído com água; F3: extraído com DTPA - extraído com $MgCl_2$; F4: extraído com ácido acético extraído com $MgCl_2$; F5: total à das frações (F1, F2, F3 e F4).

Figura 1. Percentagem do total de Mn nas frações F1, F2, F3, F4 e F5 em função dos diferentes tratamentos

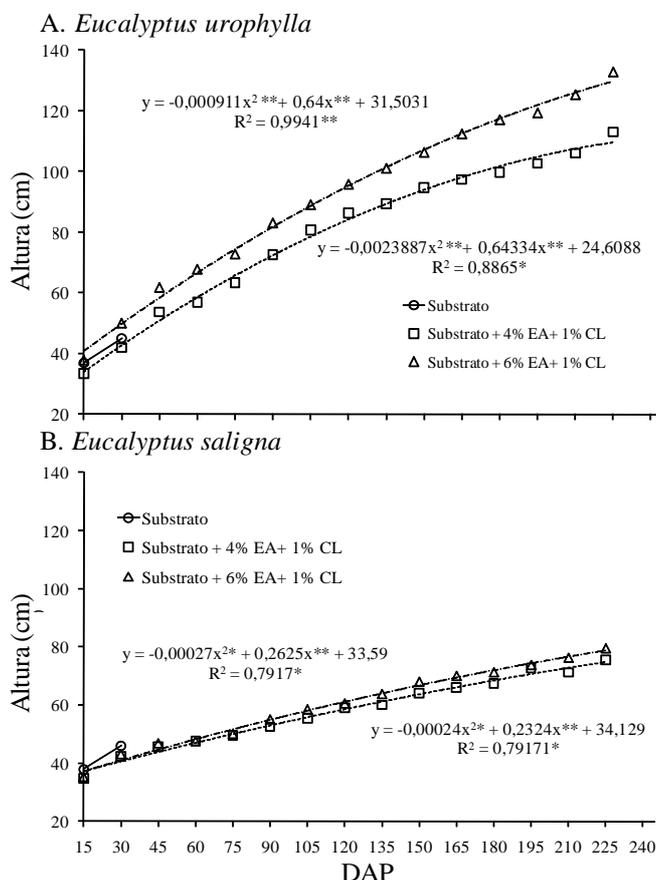


Figura 2. Altura, em cm, das espécies *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus saligna* cultivado em substrato contaminado Mn, submetido a dois tratamentos. EA, Escória de Aciaria; CL, Carepa de Laminação; DAP, dias após o plantio

pH observado neste tratamento, em torno de 4,4 (Tabela 1), levando o Mn a se apresentar sob formas mais biodisponíveis, evidenciadas na Figura 1 tornando se esses níveis tóxicos para as plantas.

Ao final do experimento o *E. urophylla* apresentou altura aproximada de 137 cm no tratamento 3 enquanto no

tratamento 2 a altura foi de 113 cm; para a *E. saligna* a diferença na altura foi menor, sendo a altura final de 75 cm na dose de 4% de escória e 79 cm na maior dose. Quando se compararam as duas espécies, verificou-se que o *E. urophylla* apresentou maior desenvolvimento e altura demonstrando a melhor resposta aos tratamentos, sendo maior na dose de 6% de Escória de Aciaria.

O maior desenvolvimento implicou, sem dúvida, na maior produção de biomassa, sendo de grande interesse em programas de revegetação de áreas contaminadas (Grazziotti et al., 2003).

Aumentos significativos na massa seca das plantas com a aplicação dos resíduos foram observados (Tabela 2), ocorrendo a maior produção de massa seca, para ambas as espécies, na maior dose de Escória de Aciaria, sendo a massa total de 90,2 g para o *E. urophylla* e de 75,8 g para o *E. saligna*.

No tratamento T3 a espécie *E. urophylla* teve um aumento na massa seca em relação ao tratamento T2, de aproximadamente 6 g para folha e caule, 9,5 g para a raiz e 23 g na biomassa total; entretanto, para a espécie *E. saligna* este aumento de matéria seca foi de 6 g nas folhas, 4 g no caule e raiz e para biomassa total de 16 g. Desta forma, o ganho em massa seca total com a maior dose de Escória de Aciaria foi maior para o *E. urophylla*, com cerca de 34%, do que para o *E. saligna*, com 27%. Comparando a produção de massa seca na parte aérea entre as espécies, observou-se que o *E. urophylla* teve maior produção no caule do que o *E. saligna*. O volume radicular também foi significativamente influenciado pela aplicação dos tratamentos. No tratamento T3 ocorreu um aumento de 59 e 26% para o *E. urophylla* e *E. saligna*, respectivamente. O volume de raiz produzido no tratamento 2 foi o mesmo para ambas as espécies. Já no tratamento 3, diferentemente da parte aérea, o *E. saligna* apresentou volume maior (89 cm³) do que o *E. urophylla* (73 cm³), indicando haver uma exploração maior do substrato pelas raízes.

As plantas cultivadas sem adição dos resíduos inertizantes apresentaram os maiores valores para ambas as espécies (Tabela 3). Observa se, neste tratamento, que o teor de Mn nas folhas foi de 946,6 mg kg⁻¹ no *Eucalyptus urophylla*, mantendo se acima da concentração considerada tóxica para as plantas de 700 mg kg⁻¹ (Furlani, 2004) e bem acima dos valores

Tabela 3. Teores de Mn nas folhas, caule, raiz e total, por plantas de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus saligna* em função dos tratamentos (mg kg⁻¹)

	Espécie	T1	T2	T3	C.V.
Folha	<i>E. urophylla</i>	946,6 bA	625,60 bB	351,80 bC	3,4
	<i>E. saligna</i>	1404,2 aA	926,03 aB	418,08 aC	
Caule	<i>E. urophylla</i>	798,7 aA	490,20 aB	220,20 aB	6,6
	<i>E. saligna</i>	855,3 aA	306,73 bB	117,61 bC	
Ramo	<i>E. urophylla</i>	*	498,20 aA	228,10 aB	10,6
	<i>E. saligna</i>	*	579,58 aA	117,18 bB	
Raiz	<i>E. urophylla</i>	588,3 aA	343,60 aB	141,60 aC	7,6
	<i>E. saligna</i>	617,8 aA	366,23 aB	160,96 aB	

* Plantas que morreram aos 30 dias após o plantio

Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. As letras minúsculas são comparadas na horizontal, comparando-se os tratamentos e letras minúsculas são comparadas na vertical e se comparando as espécies, para cada tratamento e parte vegetal

n.s - não significativo; C.V - coeficiente de variação

T1-Substrato; T2 - Substrato + 4% EA + 1% CL; T3 - Substrato + 6% EA + 1% CL

EA, Escória de Aciaria; CL, Carepa de Laminação

considerados faixa de suficiência para o eucalipto, isto é, de 400 500 mg kg⁻¹ (Gonçalves et al., 1996).

Nota-se redução significativa nas concentrações de Mn nas folhas nos tratamentos que receberam os inertizantes, de 625,6 mg kg⁻¹ para a menor dose de Escória de Aciaria e de 351,8 mg kg⁻¹ para o tratamento que recebeu a maior dose. No tratamento 3 o teor de Mn nas folhas reduziu cerca de 3 vezes o teor apresentado no substrato sem resíduos inertizantes e foi reduzido à metade, na dose de 4% de Escória de Aciaria, ficando abaixo da faixa considerada de suficiência para o eucalipto; no caule o teor de Mn no tratamento 1 foi de 798,7 e no tratamento 2 o teor é reduzido quase para a metade e no tratamento 3 ele é quase 4 vezes menor que no tratamento 1; também ocorreu diminuição nas concentrações de Mn nos ramos e nas raízes, com aplicação dos resíduos inertizantes cujos menores valores são observados no tratamento 3.

Para o *Eucalyptus saligna* também se constatou redução nas concentrações de Mn em todas as partes vegetais, com a aplicação dos inertizantes. Verifica-se que na testemunha as folhas do *E. saligna* apresentaram teores de Mn superiores a 1.400 mg kg⁻¹, valor este o dobro do teor considerado fitotóxico; já no tratamento que recebeu a menor dose de Escória de Aciaria esses teores foram reduzidos para 926,03 mg kg⁻¹ e no tratamento de maior dose, para 418,08 mg kg⁻¹. A espécie *E. urophylla* não suportou teores de Mn nas folhas de 946,6 mg kg⁻¹ no tratamento 1 e morreu aos 30 dias após o plantio enquanto a espécie *E. saligna* apresentou, no tratamento 2, teores de Mn nas folhas, de 926,03 mg kg⁻¹.

Para as duas espécies verifica-se o mesmo comportamento no acúmulo de Mn, sendo a maior absorção no tratamento 2 e a maior acumulação nas folhas (Tabela 4).

Para o *E. urophylla* constatou-se, no tratamento 2, que mais de 60% do Mn se encontram nas folhas, 20% no caule, 5% nos ramos e 12% nas raízes. Conforme já mencionado, no tratamento 2 as plantas apresentaram maior acumulação de Mn.

A espécie *E. saligna* também apresentou maior acumulação de Mn no tratamento 2 de 38,59 mg planta⁻¹; entretanto, menor do que a espécie *E. urophylla*, que apresentou acumulação de 43,1 mg planta⁻¹.

Quando comparadas as espécies, verificou-se que a espécie *E. urophylla* apresentou maiores concentrações de Mn no caule, tanto no T2 quanto no T3; já para o ramo no T2 o *E. saligna* apresentou maior valores de Mn; para as raízes só houve diferença entre as espécies no T2, mostrando um acúmulo maior de Mn, pela espécie *E. saligna*.

É oportuno salientar que a toxicidade do manganês para as plantas depende de altas concentrações biodisponíveis no solo não se devendo considerar, no entanto, apenas as concentrações pseudototais dos solos. Segundo Casagrande et al. (2005), a composição total desses elementos no solo é de pouca valia para determinar a disponibilidade para as plantas.

A solubilidade do Mn é controlada principalmente pelo pH, sendo a atividade e, conseqüentemente, a solubilidade na solução do solo, diminuídas em 100 vezes para cada aumento de uma unidade no pH (Sposito, 2008). Borges & Coutinho (2004) verificaram, aplicando biossólidos ao solo que, com o aumento do pH do solo, ocorreu redistribuição do Mn da fração trocável para a fração ligada à matéria orgânica ou óxidos menos disponíveis.

Tabela 4. Acúmulo de Mn nas folhas, caule, ramo, raiz e total por plantas de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus saligna*, em função dos tratamentos (mg planta⁻¹)

	Espécie	T1	T2	T3	C.V
Folha	<i>E. urophylla</i>	0,90 aC (50,0)	26,32 aA (61,1)	11,99 aB (53,0)	10,8
	<i>E. saligna</i>	0,40 aB (37,1)	24,55 aA (63,6)	11,87 aA (66,8)	
Caule	<i>E. urophylla</i>	0,56 aB (32,8)	8,87 aA (20,6)	5,59 aA (24,7)	20,0
	<i>E. saligna</i>	0,53 aB (46,6)	3,76 bA (9,7)	1,97 bA (10,5)	
Ramo	<i>E. urophylla</i>	*	2,39 bA (5,6)	1,42 aB (6,3)	26,4
	<i>E. saligna</i>	*	4,46 aA (11,6)	1,04 bB (5,5)	
Raiz	<i>E. urophylla</i>	0,29 aB (17,3)	5,51 bA (12,8)	3,62 aA (16,0)	14,3
	<i>E. saligna</i>	0,18 aB (16,3)	5,82 aA (15,1)	3,24 aA (17,2)	
Total	<i>E. urophylla</i>	1,70 C (100)	43,09 aA (100)	22,63 B (100)	10,3
	<i>E. saligna</i>	1,14 C (100)	38,59 bA (100)	18,82 B (100)	

* Plantas que morreram aos 30 dias após o plantio

** Valores entre parênteses representam a percentagem em relação ao total. Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. As letras maiúsculas são comparadas na horizontal, comparando-se os tratamentos e letras minúsculas são comparadas na vertical, comparando-se as espécies, para cada tratamento e parte vegetal. s – não significativo; C.V – coeficiente de variação; T1 – Substrato; T2 – Substrato + 4% EA + 1% CL; T3 – Substrato + 6% EA + 1% CLEA, Escória de Aciaria; CL, Carepa de Laminação

A diminuição nos teores de Mn nas frações biodisponíveis seguida do aumento nas frações de maior estabilidade foi devida, possivelmente, ao aumento do pH (Gupta & Sinha, 2007) proporcionado pela adição de Escória de Aciaria favorecendo a precipitação e a adsorção, através do aumento de carga líquida negativa na superfície de óxidos de Fe, Mn e Al (Lombi et al., 2002), e também do uso da Carepa de Laminação que, provavelmente, proporcionou uma adsorção específica maior do Mn. Como as reações de precipitação, complexação e adsorção de metais pesados são favorecidas pela elevação do pH (Lombi et al., 2002; Sposito, 2008), a adição dos inertizantes favoreceu a transferência do Mn da forma biodisponível para a forma não biodisponível.

A adição dos dois resíduos evidenciou efeitos amenizantes, sobremaneira da Escória de Aciaria, já que houve grande influência na produção de matéria seca (Tabela 2). Verificou-se uma diferenciação entre a maior e a menor dose de Escória de Aciaria, diferença esta significativa para todos os parâmetros avaliados, exceto para ramo, em ambas as espécies. Tal diferenciação entre os tratamentos foi provocada, por certo, pela maior biodisponibilidade do Mn no tratamento T2 em relação ao tratamento T3 (Figura 1).

O volume de raiz tem, por definição, o espaço ocupado pelo sistema radicular e indica o volume de solo explorado pelas raízes. A produção de raízes é uma característica importante quanto à fitoestabilização de áreas contaminadas com metais pesados, haja vista que protege o solo da erosão, reduz a lixiviação, favorece a agregação e a atividade microbiana do solo (Carneiro et al., 2002).

Verificou-se que as concentrações de Mn foram maiores nas folhas, em virtude, quiçá, do Mn ser essencial à síntese de clorofila e sua função também está relacionada com a ativação de enzimas que participam da fotossíntese (Lavres Júnior, et al. 2010).

Com a adição dos resíduos inertizantes ocorreu diminuição nas concentrações de Mn em todas as partes das plantas, evidenciando que houve uma absorção menor desses elementos pelas plantas, em virtude da sua menor biodisponibilidade (Figura 1). Segundo Abreu et al. (2006) a maior disponibilidade do Mn ocorre entre pH 5,0 a 6,5, evidenciados na Tabela 4, demonstrando um acúmulo total maior de Mn na menor dose de Escória de Aciaria, para ambas as espécies. Em experimento com soja Spehar (1993), verificou-se que o teor de Mn nas folhas foi reduzido de 113 mg kg⁻¹ para 29 mg kg⁻¹ com a elevação do pH de 5,1 para 5,6. Apesar do *E. saligna* apresentar comportamento na absorção de Mn semelhante ao do *E. urophylla*, as concentrações de Mn nas folhas, caule e ramos se apresentaram, em todos os tratamentos, superiores quando comparadas com as concentrações na espécie *Eucalyptus urophylla*, indicando maior tolerância ao Mn.

CONCLUSÕES

1. Os resíduos utilizados como inertizantes foram eficientes na redução da biodisponibilidade do Mn.
2. A menor dose de Escória de Aciaria foi suficiente para propiciar o desenvolvimento das plantas sendo que na maior dose de Escória de Aciaria houve maior desenvolvimento do *Eucalyptus urophylla*.
3. Os resultados obtidos sugerem que o tratamento químico do solo com os resíduos Escória de Aciaria e Carepa de Laminação, melhorou a produção de matéria seca das espécies estudadas, através da redução na biodisponibilidade de metais nos solos.

LITERATURA CITADA

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10007: Amostragem de resíduos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 21p.
- Abreu, C. A.; Lopes, A. S.; Santos, G. Micronutrientes. In: Novais, R. F.; Alvarez, V.; V. H.; Barros, N. F.; Fontes, R. L. F., Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. Cap. 6, p.646-724.
- Borges, M. R.; Coutinho, E. L. M. Heavy metals in soil after sewage sludge application: II Availability. Revista Brasileira Ciência Solo, v.28, p.557-568, 2004.
- Carneiro, M. A. C.; Siqueira, J. O.; Moreira, F. M. S. Behavior of herbaceous species in soil mixes with different degree of contamination with heavy metal. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.37, p.1629-1638, 2002.
- Casagrande, J. C.; Alleoni, L.R. F.; Camargo, O. A. Effect of pH and ionic strength on Z adsorption in highly weathered soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v.35, p.2087-2095, 2005.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análises de solos. 2ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 1997. 212p.
- Fadigas, F. S.; Amaral Sobrinho, N. M. B.; Mazur, N.; Anjos, L. H. C. Proposition of reference values for natural concentration of heavy metals in Brazilian soils. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, p.699-705, 2006.
- Furlani, A. M. C. Nutrição mineral. In: Kerbauy, G. B. Fisiologia vegetal. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. p.40-75.
- Giachetti, G.; Sebastiani, L. Metal accumulation in poplar plant grown with industrial wastes. Chemosphere, v.64, p.446-454, 2006.
- Gonçalves, J. L. M.; van Raij, B.; Gonçalves, J. C. Florestais. In: Raij, B. van; Cantarella, H.; Quaggio, J. A.; Furlani, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas: Instituto Agronômico e Fundação IAC, 1996. p.245-259. Boletim Técnico, 100
- Grazziotti, P. H.; Siqueira, J. O.; Moreira, F. M. S. Espécies arbóreas e ectomicorrizas em relação ao excesso de metais pesados. Tópicos em Ciência do Solo, v.5, p.55-105, 2003.
- Gupta A. K.; Sinha, S. Phytoextraction capacity of the plants growing on tannery sludge dumping sites. Bioresource Technology, v.98, p.1788-1794, 2007.
- Hoagland, D. R.; Arnon, D. I. The water culture method for growing plants without soils. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 1950. 347p.
- Hsu, M. J.; Selvaraj, K.; Agoramorthy, G. Taiwan's industrial heavy metal pollution threatens terrestrial biota. Environmental Pollution, v.143, p.327-334, 2006.
- ISO - International Organization for Standardization. Soil quality - Extraction of trace elements soluble in aqua regia, ISO 11466. 03-01. Genebra: ISO, 1995. 6p.
- Ives, A. R.; Cardinale, B. Foodweb interactions govern the resistance of communities after non random extinctions. Nature, v.429, p.174-177, 2004.
- Kabata-Pendias, A.; Pendias, H. Trace elements in soils and plants. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2001. 315p.
- Kasassi, A.; Rakimbei, P.; Karagiannidis, A.; Zabaniotou, A.; Tsiouvaras, K.; Nastis, A.; Tzafeiropoulou, K. Soil contamination by heavy metals: Measurements from a closed unlined landfill. Bioresource Technology, v.99, p.8578-8584, 2008.
- Kumar, P. B. A. N.; Dushenkov, V.; Motto, H.; Raskin, I. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. Environmental Science Technology, v.29, p.1232-1238, 1995.
- Lavres-Júnior, J.; Reis, A. R.; Rossi, M. L.; Cabral, C. P.; Nogueira, C. L.; Malavolta, E. Changes in the ultrastructure of soybean cultivars in response to manganese supply in solution culture. Scientia Agrícola, v.67, p.287-294, 2010.
- Lombi, E.; Zhao, F.; Zhang, G.; Sun, B.; Fitz, W.; Zhang, H.; McGrath, S.P. In situ fixation of metals in soil using bauxite residue: Chemical assessment. Environmental Pollution, v.118, p.435-443, 2002.
- Magalhães, M. O. L.; Amaral Sobrinho, N. M. B.; Mazur, N. Uso de resíduos industriais na remediação de solo contaminado com cádmio e zinco. Revista Ciência Florestal, v. 21, p.219-227, 2011.

- Mulligan, C. N.; Yong, R. N.; Gibbs, B. F. Remediation technologies for metal contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering Geology*, v.60, p.193-207, 2001.
- Paixão, F. A.; Soares, C. P. B.; Jacovine, L. A. G.; Silva, M. L.; Leite, H. G.; Silva, G. F. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. *Revista Árvore*, v.30, p.411-420, 2006.
- Santos, F. S.; Magalhães, M. O. L.; Mazur, N.; Amaral Sobrinho, N. M. B. Chemical amendment and phytostabilization of an industrial residue contaminated with Zn and Cd. *Scientia Agricola*, v.64, p.506-512, 2007.
- Soares, C. P. B.; Leite, H. G.; Gorgens, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. *Revista Árvore*, v.29, p.711-718, 2005.
- Soares, C. R. F. S.; Accioly, A. M. A.; Marques, T. C. L. L. S. M.; Siqueira, J. O.; Moreira, F. M. S. Acúmulo e distribuição de metais pesados nas raízes, caule e folhas de mudas de árvores em solo contaminado por rejeitos de indústria de zinco. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, v.13, p.302-315, 2001.
- Spehar, C. R. Composição mineral da soja cultivada em solo sob cerrado com dois níveis de calagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.28, p.645-648, 1993.
- Sposito, G. *The chemistry of soils*. 2.ed. New York: Oxford University Press, 2008. 330p.
- Wong, M. H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, v.50, p.775-780, 2003.