ISSN 0103-9954

# COMPORTAMENTO DA *Cordia africana* Lam. CULTIVADA EM SOLO CONTAMINADO POR METAIS PESADOS E TRATADO COM MATERIAIS AMENIZANTES

BEHAVIOR OF CORDIA-AFRICANA (*Cordia africana* Lam.) CULTIVATED IN SOIL CONTAMINATED BY HEAVY METALS AND TREATED WITH AMENDMENT MATERIALS

Ana Carolina Callegario Pereira[1] Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho[2] Jesus Sampaio Junior[3]
José Antonio Oliveira[4] Fabiana Soares Santos[5] Nelson Mazur[6]

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a remediação de dois solos contaminados com metais pesados, provenientes de escavações de solo localizado próximo ao porto de Itaguaí, mediante as técnicas de imobilização química e da fitoestabilização utilizando da espécie *Cordia africana*. Os dados foram coletados no pátio de minério da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), no Porto de Itaguaí–RJ. Visando reduzir a solubilidade de metais pesados presentes nestes substratos, foram utilizados como amenizantes dois resíduos industriais produzidos pela CSN, a Escória de Aciaria e a Carepa de Laminação, em diferentes concentrações. A espécie vegetal foi considerada com potencial para ser utilizada em programas de fitoestabilização, devido à sua tolerância aos metais pesados estudados e ao maior acúmulo desses elementos nas raízes e no caule. No substrato com baixa contaminação o menor acúmulo de Zinco e Cádmio no caule e folhas ocorreu com o emprego de 4% de amenizante, e no de alta com 6%.

**Palavras-chave:** Fitoestabilização; Escória de Aciaria; Carepa de Laminação.

## ABSTRACT

This study aimed to evaluate the remediation of two soils contaminated with heavy metals from soil excavations, located near the port of Itaguaí, through the techniques of chemical immobilization and phytostabilization using the species *Cordia africana*. The data were collected in the ore courtyard from 'Companhia Siderúgica Nacional' (CSN), in the port of Itaguaí, Rio de Janeiro state. In order to reduce the solubility of heavy metals present in these substrates, two industrial waste products produced by CSN were used as ameliorating products, the steelmaking slag and the mill scale, in different concentrations. The plant species was considered with potential to be used in programs of phytostabilization, due to its heavy metal tolerance studied and to high accumulation of such elements in roots and stem. In the substrate of low combination, the lowest accumulation of zinc and cadmium in stems and leaves occurred with the use of 4% of soothing. In the substrate of high accumaltion it was 6%.

**Keywords:** phytostabilization; steel slag; mill scale.

1 Engenheira Agrônoma, Mestre em Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, BR 465, km 7, Laboratorio de Química do Solo, CEP 23890-000, Seropédica (RJ). acallegario@yahoo.com.br

2 Engenheiro Agrônomo, Professor Titular do Departamento de Solos, Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, BR 465, km 7, CEP 23890-000, Seropédica (RJ). nelmoura@ufrrj.br

3 Estudante de Engenharia Agronômica, Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, BR 465, km 7, CEP 23890-000, Seropédica (RJ). Bolsista de IC/CNPq. juninho.agro@yahoo.com.br

4 Estudante Engenharia Agronômica, Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, BR 465, km 7, CEP 23890-000, Seropédica (RJ). Bolsista de IC da FAPUR. jaoliveirarural@yahoo.com.br

5 Engenheira Agrônoma, Professora Adjunta do Departamento de Engenharia de Agronegócios, Universidade Federal Fluminense, Av. dos Trabalhadores, 420, Vila Santa Cecília, CEP 27255-125, Volta Redonda (RJ). fabianasoares@metal.eeimvr.uff.br

6 Engenheiro Agrônomo, Professor Associado do Departamento de Solos, Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, BR 465, km 7, CEP 23890-000, Seropédica (RJ). nelmazur@ufrrj.br

Recebido para publicação em 20/04/2010 e aceito em 12/04/2012

## INTRODUÇÃO

A remediação de áreas impactadas vem sendo uma prioridade para a sociedade como um todo, tendo assim uma grande demanda comercial e ambiental por técnicas que possam minimizar ou recuperar essas áreas (PEREIRA, 2004).

A imobilização química é uma técnica que reduz a toxicidade e mobilidade dos metais pesados no solo através da redução da solubilidade provocada por reações de adsorção e/ou precipitação (BASTA e MCGOWEN, 2004), sendo sua eficiência comprovada para remediação de solos contaminados com metais pesados (CASTALDI et al., 2005; MESQUITA, 2006). Vários trabalhos têm descrito diversas formas de realizar a imobilização química, entre elas, a utilização de matéria orgânica (CASTALDI et al., 2002; CASTALDI E MELIS, 2004; CASTALDI et al., 2005), carbonatos de cálcio e magnésio, e óxidos de cálcio (DEROME, 2000; LOMBI et al., 2002), além de resíduos industriais com características alcalinas, como escórias de siderurgia (CHEN et al., 2000; MAGALHÃES et al., 2011).

Outra técnica remediadora é a fitorremediação, que consiste no uso de plantas mediante processos, como a fitoextração e a fitoestabilização. Na fitoestabilização são utilizadas plantas tolerantes e agentes amenizantes (ACCIOLY, 2001), para remover, mobilizar ou tornar os metais pesados menos tóxicos.

O uso de espécies arbóreas tem sido sugerido por apresentar um baixo custo, ser uma solução sustentável na remediação de solos contaminados (DICKINSON, 2000), além de possibilitar benefícios na fitoestabilização dos metais no solo, por meio de sua acumulação no sistema radicular. As árvores, por produzirem maior biomassa e acumularem maior quantidade de metais que permanecem imobilizados por mais tempo, são de grande interesse em programas de revegetação de áreas contaminadas (GRAZZIOTTI et al., 2003.).

No caso de espécies arbóreas, o conhecimento dos padrões de absorção, translocação e acúmulo de íons metálicos, os limites de tolerância e os sintomas de fitotoxidez permitem o desenvolvimento de tecnologias para a fitorremediação de áreas contaminadas por tais elementos (KAHLE, 1993). O uso de plantas de porte arbóreo e arbustivo é bem menos comum e traz a necessidade de maiores cuidados e preocupação ambiental.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar a remediação de dois solos contaminados com metais pesados, provenientes de escavações de solo localizado próximo ao porto de Itaguaí, e da Baía de Sepetiba, Itaguaí-RJ, mediante as técnicas de imobilização química e da fitoestabilização utilizando a espécie *Cordia africana* e como agentes amenizantes os resíduos industriais Escória de Aciaria e Carepa de Laminação.

## MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dois substratos, provenientes de escavações de solo, localizados no pátio de minério do Porto de Itaguaí, Itaguaí-RJ com baixo (G1) e alto (G2) níveis de contaminação por metais pesados (Tabela 1). Os substratos foram removidos do pátio de minério e dispostos em pilhas, com altura de 2 m, em uma área localizada muito próxima do aterro de resíduos perigosos, com elevadas concentrações de metais pesados, gerados pela Cia. Mercantil e Industrial Ingá.

As amostras foram coletadas nas pilhas segundo a ABNT/NBR 10.007 (2004). Após coleta, as amostras foram secas ao ar, destorroadas, peneiradas em malha de 2 mm e homogeneizadas. Para determinação das concentrações de zinco, cádmio e chumbo, as amostras foram trituradas em almofariz de ágata, e, posteriormente, digeridos com água régia (concentrações pseudototais) (ISO 11466, 1995). O valor de pH (1:2,5 $H_2O$), carbono, CTC, argila, nos dois substratos, foram determinados pelo método proposto pela EMBRAPA (1997). As características químicas e físicas e as concentrações pseudototais de zinco, cádmio e chumbo são apresentadas na Tabela 1.

Para imobilização química, empregaram-se como amenizantes dois resíduos gerados pela Companhia Siderúrgica Nacional–CSN: um com característica alcalina; Escória de Aciaria (41,87% de CaO; 4,63% de MgO; 35,54% de SiO), e outro, como adsorvente; Carepa de Laminação (CL), que é um coproduto oriundo da oxidação da superfície do aço, quando submetido ao gradiente térmico, ao meio corrosivo ou à simples ação do tempo, com alto teor de ferro (76,44% de Fe). Posteriormente, para se definir a proporção adequada do resíduo amenizante alcalino, Escória de Aciaria (EA), providenciou-se curva de neutralização, que consistiu em adicionar quantidades crescentes de EA ao solo contaminado, na proporção de: 1%; 2%; 3%; 4%; 5%, e 6% do resíduo alcalino. Esta mistura permaneceu incubada a 70% da capacidade de campo por 7 dias até a esta-

TABELA 1: Características químicas, físicas e concentração de metais pesados nos substratos.
TABLE 1: Chemical, physical characteristics and the concentration of heavy metals in substrates.

| Substrato | CTC | Corg | Argila | pH | Zn | Cd | Pb |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | cmolc $dm^{-3}$ | g $kg^{-1}$ | | 1:2,5 | mg $kg^{-1}$ | | |
| G1 | 37,6 | 23,9 | 310 | 4,4 | 814,0 | 1,8 | 54,0 |
| G2 | 39,8 | 22,9 | 310 | 5,4 | 5761,2 | 9,8 | 390,7 |
| Valor de Investigação[1] | - | - | - | - | 450,0 | 3,0 | 180,0 |

Em que: G1 e G2 = Substratos provenientes de escavações de solo, com baixo (G1) e alto (G2) níveis de contaminação por metais pesados. [1]Valor de Investigação para o cenário área de proteção máxima e/ou agrícola, segundo CONAMA (2009).

bilização do pH. Verificou-se que para atingir os valores de pH 6 e 7 era necessário adicionar as doses de 4% e 6% de Escória de Aciaria, respectivamente, para ambos os substratos. Para avaliar o potencial do resíduo Carepa de Laminação (CL) na adsorção de: zinco; cádmio, e chumbo construíram-se isotermas de adsorção para esses elementos, utilizando-se o modelo de Langmuir e determinado os valores de adsorção máxima que foram: 400 mg $kg^{-1}$ para o Cd; 604,5 mg $kg^{-1}$ para o Zn e 754,5 mg $kg^{-1}$ para o Pb. A dose de 1% para o resíduo Carepa de Laminação foi definida, considerando a capacidade de adsorção por esse resíduo de 20% do zinco extraído com DTPA no substrato G2.

As mudas de *Cordia africana* foram produzidas por meio de sementes coletadas na área do em torno do pátio de minério do Porto de Itaguaí-RJ e plantadas em tubetes plásticos de 50 $cm^3$, em maio de 2006. Selecionaram-se, para o ensaio, mudas morfologicamente homogêneas com 6 meses de idade.

Por ocasião da instalação do ensaio, coletaram-se mudas semelhantes morfologicamente às empregadas no ensaio, para o procedimento de análise química (TEDESCO et al., 1995) com o objetivo de quantificar a absorção de metais, até a ocasião do transplantio.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado com quatro repetições. Os tratamentos empregados foram: Substrato sem amenizante; Substrato + 4%EA + 1%CL; Substrato + 6%EA + 1%CL e permaneceram incubados a 80% da capacidade de campo por trinta dias, e ao final deste período, foram coletadas amostras para extração utilizando o extrator DTPA (LINDSAY e NORVELL, 1978).

Cada parcela experimental constou de um recipiente plástico com capacidade de 8 L, foram fertirrigadas com solução de Hoagland nº2 a ¼ de força iônica. A irrigação ocorreu, alternadamente, com a aplicação de água deionizada, mantendo-se umidade a 80% da capacidade de campo.

Durante o experimento foi realizada curva de crescimento para avaliar o efeito dos tratamentos no crescimento das plantas. Os parâmetros avaliados foram: altura da planta e espessura do caule a 5 cm.

Após o período do ensaio (8 meses), as plantas foram coletadas e separadas em raiz, caule e folhas, secas em estufa de circulação forçada de ar a 65ºC e moídas. No material moído procedeu-se digestão nitroperclórica (6:1) segundo Tedesco et al. (1995), avaliando-se, então, teores de zinco, chumbo e cádmio por espectrofotometria de absorção atômica com chama em aparelho VARIAN-AA600 com LD (mg $kg^{-1}$) de: 0,25 para cádmio; 0,10 para chumbo, e 0,20 para zinco, e LQ (mg $kg^{-1}$) de: 0,5 para cádmio; 0,5 para chumbo, e 0,7 para zinco.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado com quatro repetições. 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, teste de médias Tukey ao nível de 5% de probabilidade. 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

As concentrações de zinco no substrato G1 foram superiores aos valores de intervenção adotados pela CONAMA, 2009, considerando o cenário área de proteção máxima/agrícola (Tabela 1). No substrato G2, destaca-se a concentração de zinco, que foi cerca de 13 vezes superior ao valor de investigação.

A concentração biodisponível de zinco no substrato G1 correspondia a 31% do pseudototal, entretanto, com aplicação na menor dose de EA (4%), os teores de zinco na fração biodisponível fo-

ram reduzidos para 4%, e na maior dose para 2%, sendo essa redução significativa entre as doses de EA (Tabela 2). Para o substrato G2 também ocorreu uma redução significativa com adição de EA, entretanto, não houve diferença significativa entre as duas doses de EA. No G2 a quantidade de zinco extraído com DTPA correspondia a 26% do total, com aplicação das doses de EA, o zinco biodisponível foi reduzido para 13% do total.

O comportamento do cádmio e chumbo foi semelhante ao do zinco. No substrato G1, o cádmio extraído com DTPA correspondia a 83% do total, com aplicação das duas doses de EA foi para próximo de 20% do total, não havendo diferença significativa entre as duas doses de EA. No G2, a quantidade extraída com DTPA foi de reduzida de 56% para 33% após aplicação dos amenizantes, não havendo diferença significativa entre as doses de EA. Para o chumbo também não houve diferença significativa entre as duas doses de EA, para ambos os substratos.

A redução na biodisponibilidade dos metais, possivelmente, foi causada pelo aumento do pH (GUPTA e 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), como também, do uso da Carepa de Laminação que, provavelmente, proporcionou uma maior adsorção específica desses metais.

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 amenizantes favoreceu a transferência do zinco, cádmio e chumbo da forma biodisponível para a forma não biodisponível.

As plantas de *Cordia africana* desenvolvidas nos substratos que não receberam os amenizantes não toleraram, possivelmente, os níveis elevados de metais biodisponíveis (Tabela 2), e entraram em senescência antes da finalização do experimento (Figuras 1 e 2). Resultados semelhantes foram verificados por Magalhães et al. (2011), que avaliando o desenvolvimento de duas espécies de eucalipto, no mesmo substrato com elevada contaminação (G2), observaram que o desenvolvimento das plantas foi possibilitado somente nos tratamentos onde ocorreu aplicação dos amenizantes, devido, provavelmente, à redução na biodisponibilidade dos metais.

Analisando as curvas de crescimento, verifica-se que aos 4 meses do transplantio das mudas os valores de altura de plantas indicaram uma redução na velocidade do crescimento, tanto nos substratos G1 e G2 (Figuras 1 e 2). Entretanto, o diâmetro do caule apresentou um crescimento acentuado. Esta observação demostra que em substratos contaminados tratados com amenizantes o desenvolvimento da planta foi pouco afetado, tendo reduzido velocidade do crescimento da altura das plantas.

De modo geral, os valores de pH (6,0 e 7,0) encontrados com a adição dos amenizantes, favoreceram a precipitação e adsorção do metal no solo, diminuindo sua biodisponibilidade do zinco, cádmio e chumbo para as plantas (AGOURAKIS et al., 2006), conforme verificado na Tabela 2, dessa forma favorecendo o crescimento das plantas de *Cordia africana.*

A Tabela 3 apresenta os dados morfológicos das plantas obtidos oito meses após o transplantio das mudas de *Cordia africana.*

A adição de EA, para ambos os substratos, propiciou o aumento significativo da altura das plantas, não havendo diferença significativa entre as

TABELA 2: Quantidades extraídas de zinco, cádmio e chumbo (mg $kg^{-1}$) com DTPA, nos substratos G1 e G2.

TABLE 2: Extracted amount of zinc, cadmium and lead (mg $kg^{-1}$) with DTPA, at substrates G1 and G2.

| Tratamento | Zinco | | Cádmio | | Chumbo | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | G1 | G2 | G1 | G2 | G1 | G2 |
| sem amenizante | 250 (31) A | 1.500 (26) A | 1,5 (83) A | 5,5 (56) A | 10,0 (18) A | 40 (10) A |
| 4% EA+1% CL | 33 (4) B | 750 (13) B | 0,4 (22) B | 3,2 (33) B | 1,0 (2) B | 32 (8) B |
| 6% EA+1% CL | 17(2) C | 744 (13) B | 0,3 (17) B | 2,8 (29) B | 1,0 (2) B | 25 (6) B |

Em que: G1 e G2 = Substratos provenientes de escavações de solo, com baixo (G1) e alto (G2) níveis de contaminação por metais pesados; EA = Escória de Aciaria; CL = Carepa de Laminação. Os números entre parênteses representam a percentagem do pseudototal do metal extraído com DTPA. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem significativamente pelo Teste de Tukey, $p<0,05$.

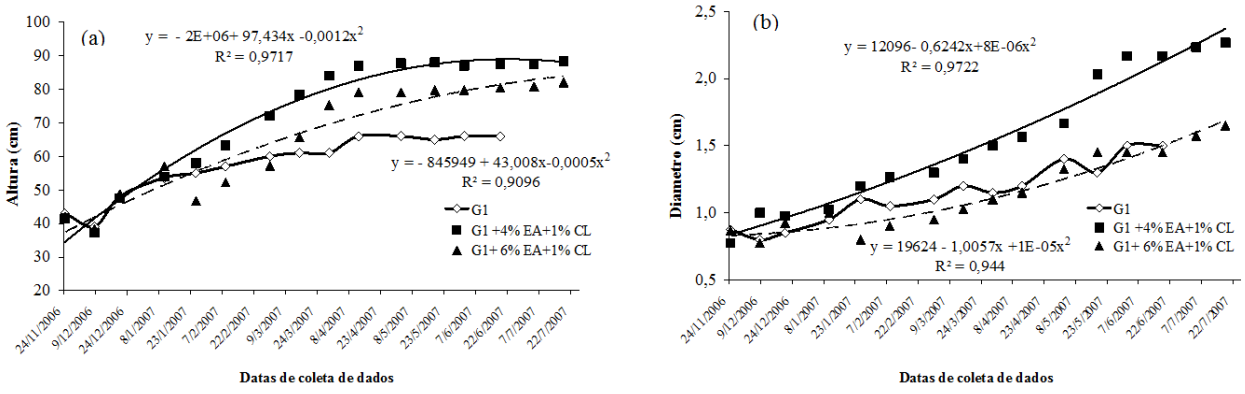


FIGURA 1: Curva de crescimento em altura (a) e diâmetro de caule a 5 cm (b) para *Cordia africana* no substrato G1 (G1: Substrato proveniente de escavações de solo, com baixo nível de contaminação por metais pesados; EA: Escória de Aciaria; CL: Carepa de Laminação).

FIGURE 1: Growth curve for height (a) and stem diameter at 5 cm (b) to *Cordia africana* in substrate G1 (G1: Substrate from excavation of soil, with low level of contamination by heavy metals; EA: Steel Slag.; CL: mill scale.).

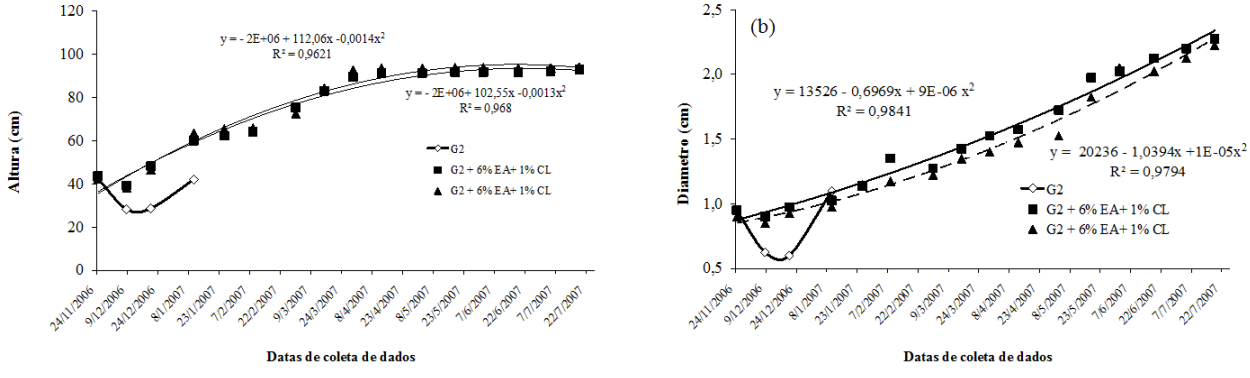


FIGURA 2: Curva de crescimento referente à altura (a) e diâmetro de caule a 5 cm (b) das plantas da espécie *Cordia africana* no substrato G2. G2: Substrato proveniente de escavações de solo, com alto nível de contaminação por metais pesados. EA: Escória de Aciaria; CL: Carepa de Laminação.

FIGURE 2: Growth curve for height (a) and stem diameter at 5 cm (b) plant species in *Cordia africana* substrate G2. G2: Substrate from excavation of soil, with high altonível of contamination by heavy metals. EA: Steel Slag.; CL: mill scale.

doses de EA.

Para o parâmetro diâmetro de caule (Tabela 3), não foi observada variação significativa em relação aos dois substratos, e nem em relação às diferentes doses de amenizante, indicando que este parâmetro não influenciou significativamente no desenvolvimento da espécie durante o período experimental.

Comparando a produção de massa seca (Tabela 3) verifica-se que a adição de amenizantes favoreceu o desenvolvimento de raízes, caule e folhas nos substratos G1 e G2. No substrato G1, a produção de matéria seca de raízes, caule e folhas foi maior na dose de EA (6%). Entretanto, para o substrato G2, a menor dose de EA (4%), apresentou uma produção de massa seca de folha e caule, significativamente, superior a da maior dose (6%), provavelmente, devido aos teores mais elevados de micronutrientes biodisponíveis em decorrência do pH mais baixo nessa dose, como pode ser verificado para zinco (Tabela 2).

O aumento de massa seca de raiz e do caule, causado pela adição de amenizantes, é uma característica importante em estratégias de fitoestabilização de metais pesados, permitindo uma maior acumulação de metais nessas partes da planta.

TABELA 3: Dados morfológicos da espécie *Cordia africana*, crescidas nos diferentes tratamentos em casa de vegetação.
TABLE 3: Morphological data of *Cordia africana*, grown in different treatments in greenhouse.

| Tratamentos | Altura | | Diâmetro do caule | | Massa seca | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | raiz | | caule | | folha | |
| | cm | | | | g | | | | | |
| | G1 | G2 | G1 | G2 | G1 | G2 | G1 | G2 | G1 | G2 |
| sem amenizante | 61,0 B | 42,0 B | 1,50 B | 1,10 B | 2,73 C | 3,77 C | 4,36 C | 5,37 C | 2,06 B | 0,0 C |
| 4% EA +1%CL | 88,7 A | 109,7 A | 2,27 A | 2,30 A | 42,57 B | 40,97 A | 22,88 B | 39,88 A | 7,59 A | 10,0 A |
| 6% EA +1% CL | 95,0 A | 94,3 A | 1,65 B | 2,23 A | 53,48 A | 45,44 A | 42,14 A | 30,00 B | 8,19 A | 8,0 B |

Em que: G1 e G2 = Substratos provenientes de escavações de solo, com baixo (G1) e alto (G2) níveis de contaminação por metais pesados; EA = Escória de Aciaria; CL = Carepa de Laminação. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem significativamente pelo Teste Tukey, $p<0,05$.

Os teores de metais nas plantas desenvolvidas nos substratos G1 e G2 sem a adição dos inertizantes foram superiores aos das plantas com a adição dos inertizantes (Tabela 4), indicando a eficiência da EA e CL na redução da biodisponibilidade de metais para as plantas, conforme verificado na Tabela 4. As concentrações de zinco, cádmio e chumbo nas diferentes partes das plantas apresentaram-se decrescentes nas raízes, caules e folhas, nos dois substratos tratados com os amenizantes (Tabela 4). Os teores desses metais nas plantas de *Cordia africana* foram mais elevados no substrato G2, em todas as partes da planta, exceto para o chumbo.

A adição de EA reduziu significativamente os teores de zinco em todas as partes da planta, nos substratos G1 e G2. Entretanto, quando se comparam as duas doses de EA, verifica-se que, no G1 não ocorreu diferença significativa nas concentrações de zinco das raízes e caule.

Esses resultados demonstram a importância da utilização de resíduos amenizantes na manutenção do desenvolvimento das plantas, já que quando desenvolvidas em substratos sem a adição dos amenizantes as plantas e *Cordia africana* entraram em senescência.

As quantidades acumuladas de zinco, cádmio e chumbo apresentaram-se também decrescentes nas raízes, caules e folhas, nos substratos G1 e G2, com as doses de amenizantes (Tabela 5).

TABELA 4: Concentração de zinco, cádmio e chumbo em diferentes partes de planta (mg $kg^{-1}$).
TABLE 4: Concentration of zinc, cadmium and lead in different parts of the plant (mg $kg^{-1}$).

| Tratamentos | Raiz | | Caule | | Folha | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | G1 | G2 | G1 | G2 | G1 | G2 |
| | | | Zinco | | | |
| sem amenizante* | 1380,5 A | 3558,6 A | 1369,0 A | 2045,8 A | 2272,8 A | 0,0 ** |
| 4% EA+1%CL | 57,1 B | 198,6 B | 17,1 B | 72,8 B | 49,1 C | 247,5 A |
| 6% EA+1%CL | 70,2 B | 146,3 C | 19,9 B | 30,6 C | 78,9 B | 123,8 B |
| | | | Cádmio | | | |
| sem amenizante | 29,5A | 17,4 A | 10,9 A | 6,7 A | 5,1A | 0,00 ** |
| 4% EA+1%CL | 1,3 B | 3,8 B | 1,1 B | 2,1 B | 0,9 B | 4,14 A |
| 6% EA+1%CL | 1,2 B | 3,1 B | 0,7 B | 1,9 B | 1,8 B | 3,95 A |
| | | | Chumbo | | | |
| sem amenizante | 6,6 B | 35,0 A | 6,7 A | 42,0 A | 17,5 A | 0,00 * |
| 4% EA+1%CL | 12,1 A | 12,8 B | 6,2 A | 5,2 B | 12,5 B | 12,9 A |
| 6% EA+1%CL | 11,5A | 15,4 B | 7,9 A | 6,6 B | 15,1 B | 13,7A |

Em que: G1 e G2 = Substratos provenientes de escavações de solo, com baixo (G1) e alto (G2) níveis de contaminação por metais pesados; EA = Escória de Aciaria; CL = Carepa de Laminação; * = Substrato sem amenizante; ** = Não houve produção de folhas. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, para cada metal, não diferem significativamente pelo Tukey, $p<0,05$.

TABELA 5: Acúmulo de zinco, cádmio e chumbo em diferentes partes da planta (mg planta$^{-1}$).
TABLE 5: Accumulation of zinc, cadmium and lead in different parts of the plant (mg plant$^{-1}$).

| Tratamentos | Raiz | | Caule | | Folha | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Zinco | | | | | |
| | G1 | G2 | G1 | G2 | G1 | G2 |
| sem amenizante[1] | 3,79A (26,1) | 21,81A (66,3) | 5,95A (41,4) | 10,61A (33,7) | 4,68A (32,6) | 0,00 [2] (0,0) |
| 4% EA + 1% CL | 2,24 B (74,5) | 8,24B (59,3) | 0,38B (13,0) | 2,92B (22,5) | 0,37C (12,5) | 2,49 (18,2)A |
| 6% EA + 1% CL | 3,75 (71,3)Ab | 6,76B (77,0) | 0,86B (16,5) | 0,91C (11,1) | 0,65B (12,0) | 0,99 (12,1)B |
| | Cádmio | | | | | |
| sem amenizante | 0,08A (57,9) | 0,07B (64,5) | 0,05A (34,1) | 0,03B (35,5) | 0,01A (8,1) | 0,00 (0,0) |
| 4% EA + 1% CL | 0,06 A (66,0) | 0,15 A (53,0) | 0,02 A (26,37) | 0,08 A (29,9) | 0,01 A (7,7) | 0,05 A (17,1) |
| 6% EA + 1% CL | 0,06 A (58,93) | 0,14 A (60,2) | 0,03A (27,67) | 0,06 B (25,8) | 0,01 A (13,40) | 0,03 B (14,0) |
| | Chumbo | | | | | |
| sem amenizante | 0,02B (21,8) | 0,01C (0,0) | 0,03C (34,7) | 0,01C (0,0) | 0,04C (43,5) | 0,00 (0,0) |
| 4% EA + 1% CL | 0,48 A (67,0) | 0,65 A (64,5) | 0,14 B (20,0) | 0,21 A (21,8) | 0,09 B (13,0) | 0,13 A (13,6) |
| 6% EA + 1% CL | 0,59 A (56,2) | 0,59 B (65,7) | 0,33 A (32,1) | 0,19 B (22,0) | 0,12 A (11,7) | 0,11 A (12,3) |

Em que: G1 e G2 = Substratos provenientes de escavações de solo, com baixo (G1) e alto (G2) níveis de contaminação por metais pesados; EA = Escória de Aciaria; CL = Carepa de Laminação; [1] = Substrato sem amenizante; [2] = Não houve produção de folhas. Os números entre parênteses representam a percentagem do total acumulado. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, para cada metal, não diferem significativamente pelo Tukey, $p<0,05$

Os menores acúmulos de metais pesados foram encontrados nas folhas. Em estratégias de fitoestabilização, o acúmulo de metais pesados na folha não é o desejado, principalmente, por se tratar de uma espécie semicaducifólia, como a *Cordia africana*, o que vai favorecer a ciclagem desses metais no solo.

De acordo com o observado em relação ao acúmulo percentual dos metais nas diferentes partes da planta, verificou-se que a espécie apresentou potencial para ser utilizada em estratégias de fitoestabilização, já que o maior acúmulo da maioria dos metais foi nas raízes e caules das plantas, além de apresentar crescimento satisfatório no solo contendo concentrações elevadas de metais pesados nos substratos tratados com os agentes amenizantes.

## CONCLUSÕES

A aplicação dos agentes amenizantes Escória de Aciaria e Carepa de Laminação reduziu a biodisponibilidade de metais pesados de modo a favorecer o crescimento e o estabelecimento da *Cordia africana* em solo contaminado.

A espécie vegetal *Cordia africana* foi considerada eficiente para ser utilizada em programas de fitoestabilização, devido a sua tolerância aos metais pesados estudados e ao maior acúmulo desses elementos nas raízes e caule.

No G1 o menor acúmulo de Zn e Cd ocorreu com 4% de amenizante e no G2 com 6% de amenizante, principalmente no caule e folhas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007: **Amostragem de resíduos**. Rio de Janeiro, 2004. 21p.

ACCIOLY, A. M. A. **Amenizantes e estratégias para estabelecimento de vegetação em solos de áreas**

**contaminadas por metais pesados**. 2001. 186 p. Tese de Doutorado em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2001.

AGOURAKIS, D. C. et al Comportamento de Zinco e Mn de pilhas alcalinas em uma coluna de solo. **Química Nova**, v. 29, p. 960-964, 2006

BASTA, N. T ; McGOWEN, S. L. Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil. **Environment Pollution**. v. 127, p. 73–82, 2004.

CASTALDI, P., MELIS, P. Growth and yield characteristics and heavy metals content on tomatoes grown in different growing media. **Communication in Soil Science Plant Analysis**, v. 35, p. 85-98, 2004.

CASTALDI, P., MULE, P., MELIS, P. Heavy metals contents in organic matter amendments based on beached Posidonia oceanica. **Annali di Chimica**., v. 90, p. 741–746, 2002.

CASTALDI, P., SANTONA, L., MELIS, P. Heavy metal immobilization by chemical amendments in a polluted soil and influence on white lupin growth. **Chemosphere,** v. 60, p. 365–371, 2005.

CHEN, H. M., et al. Chemical methods and phytoremediation on soil contaminated with heavy metals. **Chemosphere**, v. 41, p. 229–234, 2000.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério do Meio Ambiente**. Resolução nº 420,** de 28 de dezembro de 2009. 2009

DEROME, J. Detoxification and amelioration of heavymetal contaminated forest soils by means of liming and fertilization. **Environment Pollution** v. 107, p. 79–88, 2000.

DICKINSON, N. M. Strategies for sustainable woodland on contaminated soils. **Chemosphere**, v. 41, p. 259–263, 2000.

EMBRAPA/CNPS. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

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.

ISO 11466. **International Standard: Soil quality–Extraction of trace elements soluble in aqua regia**, 03–01, 1995.

KAHLE, H. Response of roots of trees to heavy metals. **Environmental Experimental Botany**, v. 33, p. 99-119, 1993.

LINDSAY, W. L., NORWELL, W. A. Development of a DTPA test zinc, iron, Mn and copper. **Soil Science Society American Proceedings**, v. 42, p. 421-428, 1978.

LOMBI, E., et al. In situ fixation of metals in soil using bauxite residue: chemical assessment. **Environment 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. **Ciência Florestal**, v. 21, p. 253-261, 2011.

MESQUITA, A. A., et al. Remediação de solos tratado com lodo rico em zinco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 738-744, 2006.

PEREIRA, A. C. C. **Uso de produtos industriais na inertização de Cádmio e Zinco presentes em resíduo classe I**. 2004. 69 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia –Ciência do Solo), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, 2004.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. Second edition. New York: Oxford University Press, 2008. 320 p.

TEDESCO, M. J., et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre : Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174p. (Boletim técnico ; n.5)