

POTENCIAL DE FITOEXTRAÇÃO DO NABO FORRAGEIRO E DA AVEIA PRETA EM ARGISSOLO CONTAMINADO POR CÁDMIO

Christina Venzke Simões de Lima¹, Egon José Meurer², Rogério Otávio Schmidt³ e Edicarlos Damacena de Souza⁴

Resumo: O acúmulo dos resíduos poluentes no ambiente acentua a preocupação com a contaminação dos solos e águas devido à presença de metais pesados em sua composição. A fitoextração é uma tecnologia promissora, no entanto, para sua utilização devem-se utilizar espécies vegetais hiperacumuladoras, com alta produção de biomassa e alto índice de translocação do metal das raízes para a parte aérea das plantas. O objetivo deste trabalho foi observar a capacidade do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) e da aveia preta (*Avena srigosa* Schreb) de acumular e translocar o metal a fim de avaliar seus potenciais para serem utilizados em fitoextração. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando-se um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico. O delineamento foi inteiramente casualizado, com cinco doses de cádmio, 0, 4, 8, 12 e 24 mg kg⁻¹, aplicados na forma de cloreto de cádmio, com três repetições. Após cultivo por 65 dias, foram coletadas a biomassa da parte aérea e raízes das plantas para análise. As duas espécies estudadas, nabo forrageiro e aveia preta, apresentaram redução de biomassa seca com o incremento das doses de Cd. O nabo forrageiro foi a espécie que acumulou maior quantidade de Cd na parte aérea e apresentou o maior índice de translocação do metal. A aveia preta, pela acentuada redução na produção de matéria seca, baixo índice de translocação e pouca quantidade de Cd acumulado, apresenta limitação para sua utilização em processos de fitorremediação. O nabo forrageiro, embora tenha reduzido a produção da matéria seca na presença do Cd, indicou, pela quantidade acumulada do metal e sua translocação para a parte aérea, ser uma espécie promissora para ser utilizada em processos de fitoextração.

Palavras-chaves: Metais pesados. Fitorremediação. Nabo forrageiro. Aveia preta.

1 Introdução

A expansão urbana e industrial está aumentando a produção de resíduos poluentes. Na composição destes resíduos são encontrados compostos xenobióticos, patógenos e metais pesados, que provocam alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, resultando em danos ao ambiente. No Brasil, produzem-se anualmente cerca de três milhões de toneladas de resíduos industriais perigosos. Deste montante, somente 600 mil toneladas recebem tratamento adequado (ABETRE, 2009) e o restante é descartado no ambiente, o que acentua, assim, a preocupação com a contaminação e poluição dos solos e das águas superficiais e subterrâneas.

Os estudos relativos a metais pesados nos ecossistemas têm indicado altas concentrações desses elementos em ambientes próximos a complexos industriais urbanos e em áreas de agricultura

tecnificada. Dentre as indústrias mais impactantes do ambiente estão as dos setores mineiro e metalúrgico, que produzem grandes quantidades de rejeitos com altos teores de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, e Zn (ALLOWAY, 1993).

A fabricação de produtos contendo cádmio (Cd) aumentou a demanda deste metal de 20 toneladas em 1920 para cerca de 20.000 toneladas nas décadas mais recentes (OLOLADE; OLOGUNDUDU, 2007). Apesar do Cd apresentar características de metal perigoso, sua aplicação é muito comum em materiais conhecidos. Por ser altamente resistente à corrosão, apresenta como principal aplicação a sua eletrodeposição como película protetora em torno de diversos objetos, aumentando assim a sua resistência à corrosão atmosférica. Dentre os objetos mais comuns revestidos com Cd encontram-se os pregos, porcas, parafusos, alicates, peças de automóveis, de caminhões, máquinas agrícolas e aviões; é utilizado como

¹ E-mail: chris.solos@yahoo.com.br.

² E-mail: egon.meurer@ufrgs.br. Av. Bento Gonçalves, 7712 Cx Postal 15 100 CEP 91540-000 Porto Alegre(RS)

³ E-mail: rogeschmidt@yahoo.com.br

⁴ E-mail: edidamacena2000@yahoo.com.br

REA – Revista de *estudos ambientais* (Online)
v.12, n. 1, p. 39-49, jan./jun. 2010

estabilizador de cloreto de polivinila (PVC) e pigmentos de plásticos e vidros (ILO, 1998). O Cd também está presente em ligas metálicas, vidros e cerâmicas esmaltadas, fertilizantes fosfatados, aditivos em indústria têxtil, produção de filmes fotográficos, amálgama em tratamento dentário e principalmente na fabricação de pilhas e baterias de Ni-Cd, que apresentam características de um tempo de vida útil superior ao das pilhas e baterias tradicionais (ILO, 1998; CARDOSO, CHASIN, 2001).

Aplicações sucessivas de resíduos contendo Cd em solos têm sido questionadas quanto ao seu possível impacto ambiental, entretanto a forma que o poluente se encontra no ambiente é que acentua o risco. O Cd pode apresentar-se complexado à matéria orgânica e/ou formar complexos de superfície com óxidos, diminuindo sua mobilidade no solo. Porém podem também formar complexos com ligantes orgânicos de baixo peso molecular, potencializando sua solubilidade (COSTA, 2005). Nesta forma mais solúvel, o impacto do Cd como poluente de solos e das águas superficiais e subterrâneas é muito mais acentuado afetando, inclusive, a atividade microbiana no solo e, conseqüentemente, a produção agrícola podendo, dessa forma, entrar facilmente na cadeia alimentar com alto potencial de risco para a saúde humana e animal. Assim, o destino do Cd, bem como de outros elementos, no solo depende de vários processos que ocorrem nesse meio, como dissolução, adsorção, complexação, migração, precipitação, complexação orgânica e absorção pelas plantas (KABATA-PENDIAS, PENDIAS, 2001).

A remoção do Cd do solo pode ser realizada por diferentes técnicas de remediação físicas e químicas, os quais são em geral, tecnicamente difíceis, de custos elevados e impactantes ao ambiente (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000). Na busca de

técnicas de menor impacto ambiental e que sejam menos onerosas, destaca-se a fitorremediação (ZEITOUNI et al., 2007). A fitorremediação é uma alternativa que utiliza espécies vegetais para descontaminar ambientes. Algumas espécies de plantas apresentam mecanismos que podem minimizar os efeitos deletérios do Cd e outros metais pesados no ambiente pela absorção, acumulação e translocação destes elementos no tecido vegetal (ZEITOUNI et al., 2007; ACCIOLY, SIQUEIRA, 2000; LASAT, 2000). No entanto, sendo uma tecnologia recente, há a necessidade de estudar a tolerância de espécies vegetais que possam se desenvolver e acumular o Cd em seus tecidos em ambientes contaminados.

Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial de fitoextração de duas espécies vegetais, o nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) e a aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) em um Argissolo contaminado por Cd.

2 Material e métodos

O estudo foi realizado em casa de vegetação utilizando-se amostras da camada de 0-15 cm de profundidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico (EMBRAPA, 2006). A escolha do solo foi baseada nos seus baixos valores de argila, capacidade de troca catiônica (CTC) e matéria orgânica para minimizar a ocorrência de reações de complexação do metal com o solo e, desta forma possibilitar a melhor avaliação de resposta das plantas ao metal. Após coleta, o solo foi seco ao ar e tamizado em peneira com orifício de 4 mm. Características e atributos químicos e físicos do Argissolo foram determinados conforme metodologia descrita em Tedesco et al. (1995) e são apresentados nas Tabela 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 - Atributos químicos do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico selecionado na camada de 0-15 cm de profundidade.

pH	Matéria Orgânica	P	K	Al trocável	Ca trocável	Mg trocável	CTC
	g kg ⁻¹	cmol _c dm ⁻³					
5,6	12	3,3	25	0,0	0,6	0,3	2,2

Tabela 2 - Atributos físicos (granulometria) do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico selecionado na camada de 0-15 cm de profundidade.

Argila	Silte	Areia
g kg ⁻¹		
70	80	850

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições por tratamento. Estes consistiram de cinco doses de Cd, 0, 4, 8, 12 e 24 mg de Cd kg⁻¹ de solo aplicado na forma de sal inorgânico usando como fonte o cloreto de cádmio (CdCl₂.H₂O) na forma solúvel, que foi misturado e homogeneizado a vasos de cinco litros contendo 5,5 kg de solo. As quantidades de Cd adicionadas aos solos foram definidas utilizando-se como referência os teores aproximados entre a faixa de alerta à intervenção máxima estabelecidos pela CETESB (2007), aproximadamente entre 3 e 20 mg de Cd kg⁻¹ de solo.

Utilizaram-se como plantas indicadoras o nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) e a aveia preta (*Avena strigosa* Schreb), por apresentarem características de rusticidade, crescimento rápido e alta produção de biomassa.

O solo recebeu adubação, para o cultivo do nabo forrageiro, equivalente às doses de 80 kg N ha⁻¹, 220 kg P₂O₅ ha⁻¹ e de 160 kg K₂O ha⁻¹; para a aveia preta equivalente às doses de 90 kg N ha⁻¹ de 220 P₂O₅ kg ha⁻¹ e de 120 kg K₂O ha⁻¹, aplicados na forma de sulfato de amônio, superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente, de acordo com as recomendações da COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO (2004).

Foram semeadas dez sementes por vaso e após emergência das plantas foi feito um desbaste deixando-se três plantas por vaso. Após crescerem por 65 dias coletaram-se as raízes e parte aérea das plantas. Durante o período experimental a umidade do solo foi mantida em 75% da capacidade de campo. As raízes e a parte aérea foram secas em estufa com ventilação forçada de ar a 65° C até peso constante. Após secagem, a biomassa aérea foi pesada e moída em moinho de facas, tipo Wiley. As raízes foram moídas em gral para não ocorrer perdas de amostra. Posteriormente, efetuou-se a digestão nítrico-perclórica, conforme Tedesco et al. (1995) adaptada por Scolmeister (1999), para a quantificação do Cd nos tecidos das plantas e a determinação do Cd nos extratos foi feita por espectrometria de absorção atômica. A quantidade de Cd acumulado na parte aérea foi calculada pelo produto da concentração de Cd na parte aérea x MS/1000, onde MS=matéria seca produzida por vaso (g

vaso⁻¹). A quantidade de Cd acumulada nas raízes pelo produto da concentração de Cd na raiz x MS/1000, onde MS=matéria seca produzida pelas raízes. A partir da quantidade acumulada, calculou-se a porcentagem de acúmulo do Cd em cada parte da planta em relação à quantidade total acumulada nas plantas. O índice de translocação (IT) do Cd foi calculado pela quantidade acumulada na parte aérea/quantidade acumulada na planta x 100.

Os resultados foram submetidos à análise da variância utilizando-se o Teste Duncan, a 5% de probabilidade para interpretar as diferenças significativas entre as médias. O programa utilizado para a análise estatística foi o SANEST (ZONTA; MACHADO; SILVEIRA,1984).

3 Resultados e discussão

Sintomas de fitotoxicidade de Cd nas plântulas do nabo forrageiro e da aveia preta foram observados nos primeiros dias após a emergência. As radículas do nabo forrageiro nos experimentos em que foram aplicados as doses de 12 e 24 mg Cd kg⁻¹ de solo ficaram escuras, curtas e grossas com posterior necrose e morte da plântula. A aveia preta apresentou as mesmas características somente na dose de 24 mg de Cd kg⁻¹ de solo, ocorrendo, também a morte das plântulas. As características do Argissolo utilizado no experimento, que contém baixos teores de matéria orgânica, de argila e de óxidos e hidróxidos de Fe, Al e Mn possibilitaram que altos teores do metal permanecessem em solução e, conseqüentemente, prontamente disponíveis às plantas.

3.1 Produção de matéria seca

O incremento das doses de Cd no solo reduziu, em ambas as culturas, a produção de matéria seca pelas raízes e pela parte aérea das plantas (Figura 1). No nabo forrageiro o efeito do Cd foi mais acentuado na parte aérea das plantas. Na presença do metal houve uma redução de até 81% da produção de matéria seca pela parte aérea em relação ao tratamento testemunha, na dose de 8 mg Cd kg⁻¹ de solo (Figura 1A).

Na aveia preta a redução na produção de matéria seca tanto nas raízes como na parte aérea das plantas foi acentuada (Figura 1B). No tratamento em que foi aplicado 12 mg Cd kg⁻¹ de solo, a redução de matéria seca na parte aérea foi de 80% em relação da obtida no tratamento testemunha enquanto que nas raízes a massa produzida foi 50 vezes menor (0,25g) do que a obtida no tratamento em não foi

aplicado Cd (1,25 g). O Cd inibe o crescimento da maioria das plantas, tanto da raiz como da parte aérea, sendo, no entanto as raízes geralmente mais sensíveis à sua presença (VILAR, 2002). Zeitouni et al. (2007) também observaram que o incremento das doses de metais pesados aplicadas ao solo diminui a produção de matéria seca de girassol, mamoneira e de pimenta.

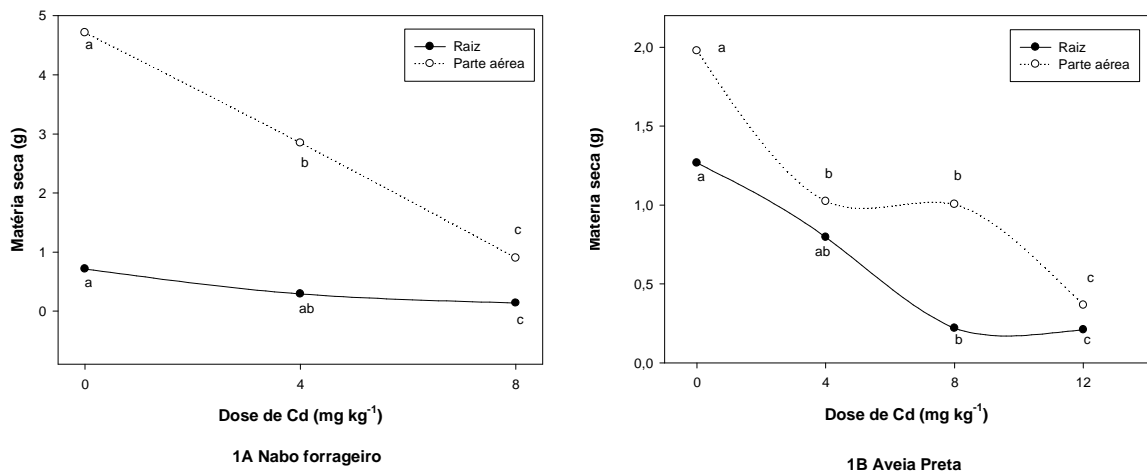


Figura 1 - Matéria seca das raízes e parte aérea da plantas de nabo forrageiro (1A) e aveia preta (1B), cultivadas em casa-de-vegetação, submetida a doses crescentes de cádmio no solo. Entre doses, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Duncan 5%

3.2 Concentração de cádmio nas plantas

O incremento nas doses de Cd aplicadas ao Argissolo resultou em significativo aumento do elemento nos tecidos (raiz e parte aérea) de ambas as plantas (Figura 2). No nabo forrageiro na dose de 8 mg Cd kg⁻¹ de solo, o teor de Cd na parte aérea alcançou 1.139 mg kg⁻¹ e nas raízes chegou a 1.067 mg kg⁻¹ (Figura 2A).

Na aveia preta, igualmente, o incremento da dose de Cd aplicada ao Argissolo também aumentou a concentração do elemento na parte aérea e na raiz. Ao contrário do observado no nabo forrageiro, a concentração do Cd nas raízes da aveia (659 mg kg⁻¹) foi muito maior que a encontrada na parte aérea (349 mg kg⁻¹). No tratamento testemunha (mg de Cd kg⁻¹ de solo) na raiz e na parte aérea de ambas as culturas não foi detectada a presença de Cd nos tecidos. Esses resultados corroboram a afirmação de Gussarsson, Adalsteinsson e Asp (1995) de que, mesmo existindo muitas incertezas sobre a especificidade dos mecanismos de

absorção dos metais pesados, geralmente o teor e o acúmulo do elemento nos tecidos dependem de sua disponibilidade na solução do solo e que os teores nas raízes e na parte aérea aumentam com o incremento da concentração dos metais na solução do solo. Mitchell, Bingham e Page (1978), constataram em milho (*Zea mays*) exposto a solo contaminado por diversos metais que a concentração de Cd também foi maior nas raízes em relação às das folhas.

Na fitoextração são utilizadas plantas com a habilidade de tolerar e acumular altas concentrações de metais como maiores do que 10.000 mg Zn e Mn kg⁻¹, maiores do que 1.000 mg Pb, Ni e Cu kg⁻¹ e maiores do que 100 mg Cd kg⁻¹ na matéria seca, quando crescem em solos com altos teores de metais (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000). A maioria das plantas fitorremediadoras conhecidas são de clima temperado (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000) e as hiperacumuladoras de Cd são raras. Na espécie *Thlaspi caerulescens*, foi detectado nas folhas da planta o acúmulo de até 1.600

REA – Revista de *estudos ambientais* (Online)
v.12, n. 1, p. 39-49, jan./jun. 2010

mg Cd kg⁻¹ (ROBINSON et al., 1998), valor aproximado ao encontrado na parte aérea do nabo forrageiro neste estudo (Figura 2A). Lombi et al. (2001) apresentaram dados que mostram que esta espécie foi capaz de acumular até 500 mg Cd kg⁻¹ quando a contaminação do solo foi de 12 mg Cd kg⁻¹. Outras espécies, como a *Brassica juncea* (CUNNINGHAM; OW, 1996), *Sedum alfredii*, encontrada na Europa (YANG et al., 2004) e

Athyrium yokoscense, uma samambaia, que é comum em áreas da Ásia (YOSHIHARA et al., 2004) já foram mencionadas como tendo capacidade de hiperacumulação de Cd. No Brasil, Carneiro, Siqueira e Moreira (2002) identificaram *Pffafia* sp., uma espécie endêmica de uma região mineradora de Minas Gerais, como hiperacumuladora de Cd, tolerando ambientes com até 90 mg Cd kg⁻¹ solo.

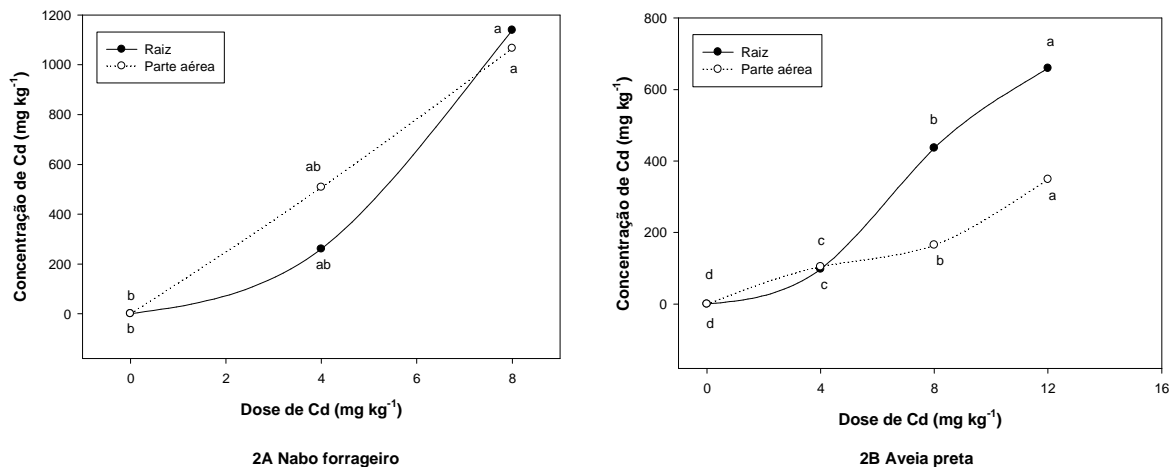


Figura 2 - Concentração de cádmio nas raízes e na parte aérea do nabo forrageiro (2A) e da aveia preta (2B) em função das doses adicionadas no solo. Entre as doses, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Duncan 5%

A maioria das plantas hiperacumuladoras possui porte relativamente pequeno, lenta taxa de crescimento, não havendo tecnologia para seu cultivo em larga escala e suas folhas são arrançadas em rosetas, permanecendo próximas à superfície do solo, tornando difícil sua remoção (ZEITOUNI et al., 2007; KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001). Desta forma, são limitadas para a utilização nas técnicas de fitorremediação. No entanto, as espécies estudadas, o nabo forrageiro e a aveia preta, que possuem características distintas das mencionadas, apresentaram valores superiores a 100 mg kg⁻¹ de Cd na massa seca, demonstrando que as herbáceas em estudo têm potencial para hiperacumular Cd. Porém, faz-se necessário comentar, que as concentrações encontradas devem-se à baixa matéria seca produzida pelas mesmas (Figuras 1A e 1B). Contudo, como mencionado, a maioria das plantas hiperacumuladoras de metais crescem lentamente e têm baixa biomassa, enquanto plantas que produzem uma alta biomassa geralmente são sensíveis às altas

concentrações do metal. Desta forma, acumular e tolerar elevadas concentrações do metal e produzir grandes quantidades de matéria seca, geralmente, não são processos que acontecem simultaneamente (ROBINSON et al., 1998). Vários autores consideram a hiperacumulação como característica mais importante do que a produção de biomassa (CHANEY et al., 1997), enquanto outros não concordam com esse parecer (EBBS et al., 1997) e acreditam que a fitoextração do metal teria maior eficiência com transformações genéticas na planta (LASAT, 2000). Porém, para o sucesso dessas transformações, faz-se necessário conhecer a capacidade de acumulação de Cd e a tolerância ao metal pelas plantas (VASSILEV; VANGRONSVELD; YORDANOV, 2002).

Na literatura, não foram encontrados trabalhos similares a este estudo, em que as concentrações de Cd aplicadas ao solo foram extremamente altas. As doses de Cd foram extrapoladas em um solo arenoso com baixos teores de matéria orgânica, de óxidos

e baixa CTC (Tabela 1) para avaliar a resposta das plantas ao estresse metálico.

3.3 Cádmio acumulado nas plantas

A quantidade de Cd acumulado nas raízes e parte aérea do nabo forrageiro e da aveia preta é apresentada na Tabela 3. Para a dose de 8 mg Cd kg⁻¹ de solo, o nabo forrageiro acumulou 0,16 mg de Cd e a parte aérea 0,96 mg de Cd. Na aveia preta a quantidade de Cd acumulada nas raízes (0,14 mg Cd) foi similar a aquela acumulada pelo nabo forrageiro; a quantidade acumulada na parte aérea foi similar a acumulada nas raízes (0,13 mg Cd), menor do que a acumulada na parte aérea do nabo forrageiro, fato que pode ser explicado pela menor produção de matéria seca da aveia

preta (Figura 1B) que foi cerca de 50% menor do que a produzida pelo nabo forrageiro (Figura 1A). Sellami et al. (2003), em *Thlaspi caerulescens* e *Brassica napus* crescendo em solo contaminado com 20 mg Cd kg⁻¹, detectaram uma concentração de 1,12 mg kg⁻¹ na parte aérea de *Thlaspi caerulescens*, enquanto que a *Brassica napus* apresentou 0,206 mg kg⁻¹, um valor bastante inferior. Porém, quando calculada a quantidade acumulada de Cd por planta, a *B. napus* acumulou 1,88 mg na parte aérea e a *Thlaspi caerulescens* apenas 0,16 mg. Esse resultado ocorreu pela maior produção de massa seca da Brassica, que foi de 60 a 120 vezes maior do que a outra espécie. Neste estudo, o nabo forrageiro apresentou maiores concentrações de Cd em seus tecidos que a aveia preta, bem como a maior quantidade total acumulada em seu tecido.

Tabela 3 - Cádmio acumulado nas partes aéreas e nas raízes de nabo forrageiro e da aveia preta em função de doses de Cd aplicadas no Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico.

Nabo forrageiro			Aveia preta		
Dose	Raiz	Parte aérea	Dose	Raiz	Parte aérea
mg kg ⁻¹	mg	mg	mg kg ⁻¹	mg	mg
0	nd	nd	0	nd	nd
4	0,08b	1,45a	4	0,08b	0,11b
8	0,16a	0,96b	8	0,11ab	0,17a
-	-	-	12	0,14a	0,13ab

Entre doses, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Duncan 5%; nd=não detectado

Embora as concentrações de Cd na parte aérea da aveia preta tenham sido altas, a quantidade total de Cd acumulado foi baixa, em função da baixa produção de matéria seca da mesma, o que limita a utilização dessa espécie em processos de fitoextração. Segundo Zeitouni et. al (2007), a alta concentração de um metal na matéria seca da planta não significa necessariamente que tal planta foi eficiente em extrair o metal do solo, pois a extração do metal está diretamente relacionada com a quantidade de matéria seca produzida pela planta. No entanto, apesar da baixa matéria seca obtida, o nabo forrageiro extraiu até 1,45 mg de Cd na parte aérea na dose de 4 mg kg⁻¹. Em contrapartida, a aveia preta acumulou valores baixos, sendo que a maior quantidade acumulada foi na dose de 8 mg kg⁻¹, com o teor de 0,17 mg (Tabela 3). A parte da planta mais importante para o metal permanecer acumulado é a aérea, pois pode ser facilmente colhida pelas técnicas tradicionais.

Robinson et al. (1998), estudando *Thlaspi caerulescens*, estimaram que se a produção de biomassa fosse de cerca de 5 t ha⁻¹, o solo contaminado por 10 mg kg⁻¹ de Cd seria descontaminado em apenas 2 anos. Zeitouni et al. (2007), avaliaram o potencial fitoextrator de girassol, mamoneira, tabaco e pimenta da Amazônia para contaminações de Cd, Pb, Cu, Ni e Zn. As doses utilizadas para Cd foram 0, 0,75 e 1,5 mg kg⁻¹. A eficiência das espécies em remediar uma área contaminada com Cd variou muito quando se leva em consideração o número de cultivos necessários para cada espécie, sendo que o tabaco foi a mais eficiente sendo necessários 15 cultivos para remover o Cd do solo. Espécies de curta rotação demonstram ter capacidade para acumular elevadas quantidades de alguns metais, entre eles o Zn e Cd (RIDDELL-BLACK; PULFORD; STEWART, 1997).

A importância da acumulação do Cd na parte aérea da planta se deve ao fato que a remoção da biomassa vegetal cultivada do ambiente é facilitada e o metal pode ser

reciclado, ou seja, pode estar sendo extraído da planta para sua reutilização. Uma vez que os íons metálicos tenham sido absorvidos e concentrados nos tecidos vegetais de plantas hiperacumuladoras, a biomassa é colhida, seca e calcinada para reciclagem ou estocada (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001).

3.4 Índice de Translocação

Outro parâmetro analisado para avaliar o potencial das plantas em extrair o Cd do solo foi o índice de translocação de cádmio (IT). Ele indica quanto do cádmio acumulado pela planta foi translocado para a parte aérea. Quanto maior o IT, maior a quantidade translocada para a parte aérea.

No nabo forrageiro, para a dose de 4 mg Cd kg⁻¹, 94,8% do cádmio absorvido pela planta foi translocado. Na dose de 8 mg kg⁻¹

este valor foi de 84,4% (Tabela 4). Esses valores são similares aos encontrados por Soares et al. (2001), estudando o acúmulo e distribuição de Cd em 20 espécies arbóreas nativas, em que a espécie *Dendropanax cuneatum* apresentou 94% de índice de translocação. Rossi (2007), trabalhando com doses crescentes de Cd em solução com feijão de porco, relatou que o índice de translocação (IT) do Cd foi de 68,9% para a concentração de 25 µmol Cd L⁻¹ e de 48,0% para a concentração de 100 µmol Cd L⁻¹, demonstrando que em menor dose, o Cd se move mais facilmente para a parte aérea do que quando aplicado em maior dose, como observado neste estudo. Embora as plantas herbáceas sejam espécies bastante estudadas em ambientes contaminados por metais pesados, existem poucos estudos relacionados à presença de metais com o índice de translocação.

Tabela 4 - Índice de Translocação (IT) de cádmio nas espécies de nabo forrageiro e aveia preta em função das doses crescentes de cádmio aplicadas no solo

Nabo forrageiro		Aveia preta	
Dose	IT	Dose	IT
mg kg ⁻¹	(%)	mg kg ⁻¹	(%)
0	0	0	0
4	94,8	4	57,9
8	84,4	8	59,2
-	-	12	48,1

O acúmulo de metais pesados no tecido vegetal varia de uma espécie para outra. As diferentes partes da planta atuam de modo distinto, de acordo com o elemento considerado e com as fontes e as doses utilizadas. Segundo McBride (1994), metais absorvidos na forma catiônica, como Zn, Cu, Pb e Mn, translocam pouco para a parte aérea. O Cd no interior da planta torna-se relativamente móvel (CARDOSO; CHASIN, 2001). Korentajer (1991), avaliando a transferência de metais pesados do solo para algumas espécies de hortaliças como cenoura, brócolis, alface, espinafre, couve, beterraba, aipo e alho porró, observou que a taxa de transferência varia entre as espécies e, para uma mesma planta, varia de metal para metal. Os metais Cd e Zn foram os que apresentaram as maiores taxas de transferência já o Cr e o Pb as menores.

Para a aveia preta, na dose de 4 mg kg⁻¹, 57,9% do Cd absorvido pela planta foi translocado. Na dose de 8 mg kg⁻¹ este valor

foi de 59,2% e, na dose de 12 mg kg⁻¹ o índice de translocação teve uma redução para 48,1%, demonstrando que até a dose intermediária de 8 mg kg⁻¹ a translocação tem sido eficiente, pois mais de 50% do que foi absorvido é translocado. No entanto, com o incremento da dose (12 mg kg⁻¹) a planta continua acumulando, porém, principalmente, nas raízes (Tabela 3). Trabalhos realizados por Hoffmann et al. (2004) mostraram que a concentração de Cd na matéria seca da parte aérea de arroz (*Oryza sativa*), em Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Argissolo Vermelho - Amarelo (PVA), foram inferiores aos encontrados nas raízes, confirmando que a raiz atuou como um filtro para retenção deste elemento.

Percebe-se que diferentes espécies vegetais expostas a uma concentração similar de metais pesados podem diferir na absorção e/ou na distribuição interna dos mesmos na planta. Isso pode resultar em

diferenças na capacidade de retenção do elemento absorvido nas raízes e/ou na variação na carga no xilema.

3.5 Relação entre altura das plantas e as doses de cádmio

Como mencionado anteriormente, a maioria das plantas hiperacumuladoras possui porte pequeno e suas folhas são arrançadas em forma de rosetas, tornando difícil sua remoção. Portanto, a altura da planta é uma característica importante nos requisitos de espécies recomendadas para fitorremediação, no intuito de que haja facilidade na colheita da biomassa.

No nabo forrageiro somente para a dose de 8 mg Cd kg⁻¹ houve significativa redução na altura das plantas (Figura 3A), cerca de 58% de sua altura. As folhas apresentaram sintomas de clorose, tornando-se discretamente amareladas; segundo

Vassilev, Vangronsveld e Yordanov (2002), o Cd, presente em concentrações tóxicas, diminui o conteúdo de clorofila em muitas espécies de plantas.

Para a aveia preta, houve a redução da altura com a aplicação das doses menores de Cd ao solo e não foi observada diferença na altura das plantas para as doses maiores do que 4 mg Cd kg⁻¹ (Figura 3B); a redução da altura das plantas foi acentuada devido à alta fitotoxidez. Os sintomas de toxicidade de metais pesados aparecem na parte aérea das plantas, sendo caracterizados por clorose internerval generalizada, manchas roxas e marrons escuras, redução do crescimento e, até mesmo, pela morte de folhas e/ou da planta (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000). Vários autores têm demonstrado que plantas crescendo em substratos contaminados com Cd mostram reduzidas taxas de transpiração, condutância estomática e assimilação líquida de CO₂ (VILAR, 2002).

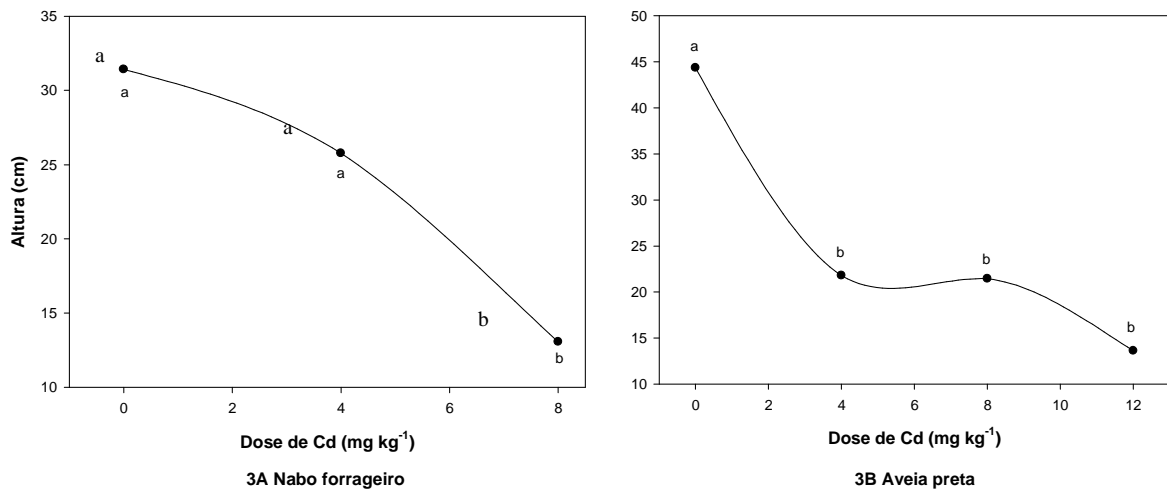


Figura 3 - Médias das alturas de plantas de nabo forrageiro (3A) e da aveia preta (3B), cultivadas em casa-de-vegetação, submetidas a doses crescentes de cádmio no solo. Entre as doses, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Duncan 5%

A agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (USEPA) considera fitotóxico a dose do elemento que provoca uma redução de 50% no crescimento das plantas (USEPA, 2008). As duas espécies apresentaram redução de aproximadamente 50%, confirmando a fitotoxidez. O nabo forrageiro apresentou resultados que corroboram com a afirmação de Kabata-Pendias; Pendias (2001), que considera que o nível crítico de Cd no solo, no qual o crescimento da planta é reduzido, é de 8 mg kg⁻¹. No entanto a aveia preta demonstrou

efeitos fitotóxicos já para a primeira dose de Cd aplicada (4 mg Cd kg⁻¹). A capacidade das plantas acumularem altas concentrações de metais sem efeitos prejudiciais ao seu crescimento enfatiza seu potencial em retirar metais dos solos.

4 Conclusões

1 As duas espécies estudadas, nabo forrageiro e aveia preta, apresentaram

REA – Revista de *estudos ambientais* (Online)
v.12, n. 1, p. 39-49, jan./jun. 2010

redução de biomassa seca com o incremento das doses de Cd.

2 O nabo forrageiro foi a espécie que acumulou maior quantidade de Cd na parte aérea e apresentou o maior índice de translocação do metal.

3 A aveia preta, pela acentuada redução na produção de matéria seca, baixo índice de translocação e pouca quantidade de Cd acumulado, apresenta limitação para

sua utilização em processos de fitorremediação.

4 O nabo forrageiro, embora tenha reduzido a produção da matéria seca na presença do Cd, indicou, pela quantidade acumulada do metal e sua translocação para a parte aérea, ser uma espécie promissora para ser utilizada em processos de fitoextração.

5 Phytoextraction potential for turnip and black oat in a cadmium contaminated hapludult soil

Abstract: *The accumulation of waste pollutants in the environment increases the concern about contamination of soil and groundwater due to the presence of heavy metals in its composition. Phytoextraction is a promising technology, however, phytoextraction demands hyperaccumulator plant species's use, with high biomass production and high rate of metal translocation from roots to the shoots. The objective of this work was to observe the ability of turnip (*Raphanus sativus* L.) and oat (*Avena strigosa* Schreb) to accumulate and translocate the metal, to assess their potential for use in phytoextraction. The experiment was conducted in a greenhouse, using a Hapludult soil. The experimental design was completely randomized with three doses of cadmium: 0, 4, 8, 12 and 24 mg kg⁻¹, applied as cadmium chloride, with three replications. After 65 days, were collected from the biomass of shoots and roots of plants for analysis. Both species, turnip and oat, showed a reduction in biomass with increasing doses of Cd. The turnip was the species that accumulated more Cd in shoots and showed the highest rate of translocation of the metal. The oat, due to his reduction in dry matter production, low rate of translocation and small amounts of Cd accumulated, shows limitations for use in phytoremediation processes. Turnip, although a reduction in production of dry matter in the presence of Cd, denotes through the accumulated amount of metal and their translocation to the shoot, be a promising species for use in phytoextraction procedure.*

Key-words: Heavy metals. Phytoremediation. Turnip. Oat.

6 Referências

ABETRE - Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos. Disponível em: <<http://www.abetre.org.br/>> noticia_completa.asp? NOT_COD=373. Acesso em: 27 jan. 2009.

ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V.; V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 299-352.

ALLOWAY, B.J. **Heavy metals in soils**. New York: John Wiley & Sons, 1993. 339p.

CARNEIRO, M. A. C.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. de S. Comportamento de espécies herbáceas em misturas de solo com diferentes graus de contaminação com metais pesados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 11, p. 1629-1638, 2002.

CARDOSO, L. M. N.; CHASIN, A.A. M. **Ecotoxicologia do cádmio e seus compostos**.

Salvador: CRA, 2001. 122p. (Cadernos de referência ambiental, v.6)

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso em: 29 jan. 2007.

CHANEY R. L. et al. Phytoremediation of soil metals. **Current Opinion Biotechnology**, Londres, v. 8, 279-284, 1997.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10 Ed. Porto Alegre: SBCS.Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004. 394 p.

COSTA, C. N. **Biodisponibilidade de metais pesados em solos do Rio Grande do Sul**. 78f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia,

REA – Revista de *estudos ambientais* (Online)
v.12, n. 1, p. 39-49, jan./jun. 2010

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CUNNINGHAM, S. D.; OW, D. W. Promises and prospects of phytoremediation. **Plant Physiology**, Baltimore, v.110, n. 3 p. 715-719, 1996.

EBBS S.; et al. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil. **Journal Environmental Quality**, Madison, v.26, p. 1424-1430, 1997.

EMBRAPA. Centro Nacional e Pesquisa em Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306 p.

GUSSARSSON, 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**, Dordrecht, v.171, p. 185-187, 1995.

HOFFMANN, R. B. Et al. Efeito da aplicação de diferentes produtos na solubilidade de Cd em solos tratados com lodo de esgoto enriquecido. **Revista Universidade Rural - Série Ciências da Vida**. Seropédica, Rio de Janeiro : EDUR, 2004. v. 24, n. 1. p. 37-43.

ILO – **Encyclopaedia of Occupational Health and Safety**. 4th ed. Geveva, 1998.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3.ed. Boca Raton : CRC Press, 2001. 413p.

KORENTAJER, L. A review of the agricultural use of sewage sludge: benefits and potential hazards. **Water S.A.**, Pretoria, v.17, n.3, p.189-196, 1991.

LASAT, M. M. Phytoextraction of metals from contaminated soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues. **Journal of Hazardous Substance Research**, Louisiana, v. 2 p. 5-25, 2000.

LOMBI, E.; ZHAO, F.J.; DUNHAM, S.J.; McGRATH, S.P. Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils: natural hyperaccumulation versus chemically enhanced phytoextraction. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 30, p.1919-1926, 2001.

MARQUES, T.C.L.L.S.M.; MOREIRA, A.M.S.; SIQUEIRA, J.O. Crescimento e teor de metais de mudas de espécies arbóreas cultivadas em solo contaminado com metais pesados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.1, p.121-132, 2000.

McBRIDE, M. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford, 1994. 406 p.

MITCHELL, G.A.; BINGHAM, F.T.; PAGE, A.L. Yield and metal composition of lettuce and wheat

grown on soils amended with sewage sludge enriched with cadmium, copper, nickel, and zinc. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.7, n.2, p.165-171, 1978.

OLOLADE I. A.; OLOGUNDUDU, A. Concentration and bioavailability of cadmium by some plants. **African Journal of Biotechnology**, Nigéria, v. 6, n.16, p. 1916-1921, 2007.

RIDDELL-BLACK D.; PULFORD, I. D.; STEWART C. Clonal variation in heavy metal uptake by willow. **Aspects of Applied Biology**, Coventry, v.49, p. 327–334, 1997.

ROBINSON B. H. et al. The potential of *Thlaspi caerulescens* for phytoremediation of contaminated soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.203, p. 47–56, 1998.

ROSSI S. C. **Fisiologia de leguminosas com potencial fitoextrator para o metal pesado Cádmio**. Campinas : IAC, 2007. 72f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto agrônômico, Campinas, 2007.

SCOLMEISTER, D. **Biodisponibilidade de metais pesados em solos do Rio Grande do Sul**. 1999. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

SELLAMI, R. et al. **Short-term phytoextraction of soil Cd with *Thlaspi caerulescens* and rape**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE BIOGEOCHEMISTRY OF TRACE ELEMENTS, Uppsala, Suécia, 2003. **ANAIS...Suécia**: SLU Service, 2003. p.204-205.

SOARES, C. R. F. S. et al. 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**, Campinas, v.13, n. 3, p. 302-315, 2001.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de solos da UFRGS, 1995. 174p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). The Clean Green— **Phytoremediation: Produced by U.S. EPA Environmental Response Team**. Disponível na internet: <<http://www.clu-in.org/studio/video.cfm>>. Acesso em 20 de janeiro de 2008.

VASSILEV, A.; VANGRONSVELD, J.; YORDANOV, I. Cadmium phytoextraction: present state, biological backgrounds and research needsbulg. **Journal Plant Physiology**, Bethesda, v. 28, n.3–4, p. 68–95, 2002.

REA – Revista de *estudos ambientais* (Online)
v.12, n. 1, p. 39-49, jan./jun. 2010

VILAR, T. B. **Efeito da turfa na descontaminação de solos com cádmio recorrendo a plantações de sorgo.** Lisboa : IST, 2002. 54f. Monografia (Licenciatura em Engenharia do Ambiente) - Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2002.

YANG X. E; et al. Uptake and accumulation of cadmium and Zinc by *Sedum alfredii* Hance at different Cd/Zn supply levels. **Journal Plant Nutrition**, Filadélfia, v. 27, n. 11, p. 1963–1977, 2004.

YOSHIHARA, T. et al. Induction of callus from a metal hypertolerant fern, *Athyrium yokoscense*, and evaluation of its cadmium tolerance and accumulation capacity. **Plant Cell Reports**, Berlim, v. 23, n. 8, p. 579-585, 2004.

ZEITOUNI, C. F. et al. Fitoextração de cádmio e zinco de um Latossolo vermelho-amarelo contaminado com metais pesados. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.4, p.649-657, 2007.

ZONTA, E.P.; MACHADO, A.A.; SILVEIRA, P. **Sistema de análise estatística para microcomputadores (SANEST).** Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 1984.

7 Agradecimentos

Ao técnico Adão Luis Ramos dos Santos, do Departamento de Solos da UFRGS, pela contribuição nas análises laboratoriais e ao Dr. João Paulo Cassol Flores pelas sugestões na revisão deste artigo. Ao CNPq pelo apoio financeiro ao presente estudo.