

# INFLUÊNCIA DE CÁDMIO EM SOLUÇÃO MONOESPÉCIE E MULTIESPÉCIE NA SORÇÃO DE METAIS EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO HÚMICO

Gláucia Carine dos Santos<sup>1</sup>

Rafael de Souza Tímbola<sup>2</sup>

Antônio Thomé<sup>1</sup>

Pedro Domingos Marques Prietto<sup>1</sup>

## RESUMO

O estudo do transporte de contaminantes inorgânicos no solo é de notável importância, sobretudo, quando são considerados os riscos que esses contaminantes podem ocasionar à qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Dentre os contaminantes inorgânicos, estão os metais tóxicos, que se apresentam sob diversas formas e exibem comportamentos físicos e químicos diferentes. O objetivo do trabalho é avaliar a sorção de cádmio em solução monoespécie e multiespécie de metais no solo residual de basalto de Passo Fundo - RS. Amostras de solo foram coletadas do campo experimental de geotecnia da Universidade de Passo Fundo para a moldagem de corpos de prova. Os ensaios foram realizados com a percolação de 5 mg/L de cádmio em solução contaminante monoespécie e a percolação de 5 mg/L dos metais cromo, cádmio, níquel e chumbo, em soluções multiespécie, estando a solução multiespécie sob a concentração total de metais de 20 mg/L. Os corpos de prova foram divididos em cinco camadas e submetidos ao método 3050B-EPA para a extração dos metais. Os resultados possibilitaram encontrar os valores de sorção presentes em cada camada submetida ao método. Cádmio apresentou diferença no valor de sorção quando submetido à solução monoespécie e multiespécie de metais. A maior retenção de cádmio foi observada quando presente em solução multiespécie de metais.

**Palavras-chave:** solo, metal tóxico, retenção

<sup>1</sup> Mestrado em Engenharia, Universidade de Passo Fundo – UPF. E-mail: [glauciacarine@gmail.com](mailto:glauciacarine@gmail.com)

<sup>2</sup> Curso de Engenharia Ambiental, Universidade de Passo Fundo – UPF.

## ABSTRACT

**The influence of cadmium in multispecie and monospecie solution on the sorption of metals in humic Oxisoil.** The study of the transport of inorganic contaminants in soils has great importance, especially when considering the risk that contaminants may cause in the quality of surface water and groundwater. Among these inorganic contaminants there are toxic metals, which are presented in many different chemical forms that exhibit different physical and chemical behavior. The objective is to evaluate the sorption of cadmium in multispecie and monospecie solutions in the residual basalt soil of Passo Fundo - RS. Soil samples were collected from experimental field of geotechnical engineering at the University of Passo Fundo to molding specimens. The tests were performed with percolation of 5 mg/L of cadmium in monospecie solution and 5 mg/L of toxic metals chromium, cadmium, nickel and lead in multispecie solution, where in multispecie solution the total concentration of metals was 20 mg/L. The specimens were divided into five layers and subjected to the 3050B-EPA method for extraction of the metals. It was possible to find the values of sorption present in each layer subjected to this method. Cadmium showed differences in sorption value when subjected to monospecie and multispecie solutions. The highest cadmium retention was observed when it presents in multispecie metal solution.

**Key words:** soil, toxic metal, retention

## INTRODUÇÃO

O solo, recurso importante para a subsistência e o desenvolvimento dos seres vivos, tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores preocupados com a sua contaminação. Diversos íons ou compostos de natureza orgânica ou inorgânica podem contaminar o solo, águas superficiais, subterrâneas ou sedimentos. Dentre os contaminantes inorgânicos, estão os metais tóxicos, que recebem atenção especial devido à sua alta toxicidade. Embora o solo apresente capacidade natural para reter alguns metais, o excesso de contaminante no solo pode sobrecarregar a sua capacidade de retenção (Sangui e Sasi, 2001), podendo resultar em lixiviação do contaminante.

A grande utilização de metais tóxicos em diversas aplicações, tais como na indústria, na agricultura e no saneamento, contribuiu para o aumento da contaminação do solo, possibilitando a ocorrência de contaminação por diferentes espécies metálicas simultaneamente (Diels et al., 2002). As interações que ocorrem entre os contaminantes e as frações do solo podem influenciar o comportamento físico e físico-químico do material (Elzahabi e Yong, 2001).

Um dos aspectos que distingue os metais tóxicos de outros elementos tóxicos, além de sua não biodegradabilidade, é que a sua toxicidade é controlada pelas suas propriedades físicas e químicas, onde o estado de oxidação pode determinar a mobilidade, a biodisponibilidade e a toxicidade de algumas espécies metálicas (Meurer, 2006). O grau de mobilidade, atividade e biodisponibilidade dependem de vários fatores, tais como: pH, temperatura, potencial redox, capacidade de troca catiônica, competição com outros metais, ligação com ânions e a composição e força iônica da solução do solo (Pedrotti e Mello Jr., 2009).

A USEPA (*The U. S. Environmental Protection Agency*) identificou diversas substâncias químicas tóxicas, baseando-se pelos efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente, agrupando-as em categorias. No grupo das substâncias químicas inorgânicas, estão incluídos os metais tóxicos, como Cr, Cd, Ni, Pb e Hg (USEPA, 2004). Visto que o cádmio está entre os metais que oferecem risco à saúde humana e ao meio ambiente, a seguir são apresentadas algumas considerações sobre esse metal.

O cádmio é um elemento metálico, branco acinzentado, dúctil à temperatura ambiente e bom condutor de calor e eletricidade. Não reage com o oxigênio do ar, mas forma óxido quando aquecido. Possui diversas aplicações industriais, por exemplo, na galvanoplastia, em ligas de baixo ponto de fusão, soldas, baterias e em pigmentos, tendo como principal uso como anticorrosivo (Who, 1992; Rana, 2007). A aplicação na agricultura de fertilizantes fosfatados representa uma entrada direta de cádmio em solos agrícolas. A presença de cádmio no meio ambiente ocorre devido a vários fatores que incluem: indústria de tinta, pigmentos, plásticos, pilhas, acumuladores, fotografia, galvanização, operações minerais e metalúrgicas (Who, 1992).

Preocupações sobre o efeito do cádmio à saúde são devidas à tendência de acumulação do elemento em mamíferos. A exposição, até mesmo, a baixos níveis do elemento pode conduzir a problemas de saúde (Rana, 2007).

A adsorção do cádmio no solo pode ocorrer nas superfícies negativas de minerais e da matéria orgânica através de reações de troca de cátions. Nesse tipo de adsorção, o cádmio pode ser adsorvido por plantas, já que está em equilíbrio com a solução do solo. Além desse tipo de adsorção, o cádmio pode ser adsorvido química ou especificamente onde, neste caso, ele permanecerá menos disponível. A disponibilidade de cádmio depende dos mecanismos que controlam a sua solubilidade no solo, tais como pH, matéria orgânica, capacidade de troca de cátions, argilominerais, dentre outros (Martins, 1984).

A disponibilidade de cádmio no solo aumenta com o aumento da acidez do solo, provavelmente, pelo aumento da solubilidade dos compostos de cádmio, tais como hidróxidos, fosfatos e carbonatos. Outro fator que pode explicar esse aumento da disponibilidade de cádmio é devido ao acréscimo, em condições de acidez, dos íons  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  e  $\text{H}^+$  que irão competir com o cádmio pelos sítios de troca de solo (Miller et al., 1976 apud Martins, 1984).

O ensaio de coluna é um dos principais ensaios capazes de fornecer informações acerca dos parâmetros de transporte de contaminantes (Demuelenaere, 2004). O objetivo do ensaio é determinar os parâmetros de transporte, coeficiente de dispersão e fator de retardamento, que descrevem a migração de espécies químicas ou contaminantes, através de um meio poroso, em condições controladas de laboratório (Shackelford, 1995 apud Azevedo et al., 2005). O ensaio de coluna permite a avaliação da condutividade hidráulica e reproduz o transporte de um contaminante pelo solo. Tal ensaio simula a percolação de um contaminante de concentração conhecida pelo solo, com fluxo ascendente (Nascentes, 2006). Segundo Buszewski e Kowalkowski (2006), o experimento de lixiviação em coluna pode prever quantitativamente a adsorção e o transporte dos diferentes contaminantes no solo sob diversas condições.

## MATERIAL E MÉTODOS

Amostras de solo foram coletadas do campo experimental de geotecnia da Universidade de Passo Fundo através da abertura de uma trincheira. Nesta, blocos de solo com 30 cm de aresta foram coletados a uma profundidade de 1,50 metros (horizonte B). Após, os blocos foram devidamente acondicionados para posterior moldagem dos corpos de prova, com estrutura indeformada, conforme sequência apresentada na figura 1.



Figura 1. Abertura da trincheira, amostragem, acondicionamento e moldagem dos corpos de prova, respectivamente.

O solo do município de Passo Fundo, RS, é um material residual de basalto e pertence à província geológica do planalto rio-grandense, segundo a geologia do Rio Grande do Sul, e à bacia do Paraná, segundo a geologia do Brasil (Bertorelli e Haralyi, 1998). Esse solo recebeu derrames vulcânicos de basalto, no período mesozóico, sobre um pacote de rochas sedimentares. Segundo Streck et al. (2008), a classificação pedológica é de um Latossolo Vermelho Distrófico húmico. Na tabela 1, são apresentadas as características físico-químicas do solo em estudo.

Tabela 1. Propriedade geotécnica e química do solo em estudo.

Parâmetro	Valor
Argila (%)	67
Silte (%)	5
Areia (%)	28
Limite de Liquidez (%)	53
Limite de Plasticidade (%)	42
Índice de Plasticidade	11
Peso específico real dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	26,70
Umidade Natural (%)	34,62
Peso específico natural (kN/m <sup>3</sup> )	16,30
Índice de Vazios	1,19
Grau de Saturação (%)	75,70
Porosidade (%)	54
pH (H <sub>2</sub> O)	5,00
Matéria Orgânica (%)	0,80
CTC (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	12,50
Permeabilidade (m/s)	1,39.10 <sup>-5</sup>
ASE <sub>interna+externa</sub> (m <sup>2</sup> /g)	33,86

Quinze corpos de prova, com solo indeformado, foram moldados com as dimensões de 10 cm de comprimento e 5 cm de diâmetro. As dimensões, a massa e os índices físicos de cada corpo de prova foram registrados. Os dados referentes a cada corpo de prova são apresentados na tabela 2, assim como a ordem de execução e aleatorização obtida para os ensaios.

Tabela 2. Características físicas dos corpos de prova e ordem de execução e aleatorização dos ensaios.

Ensaio	Corpo de Prova	Tratamento	Diâmetro médio	Desvio Padrão	Altura média	Desvio Padrão	Massa (g)	Volume Total	Porosidade (n)	Índice de vazios	Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )
1	1	Ni <sup>2+</sup>	5,16	6,83.10 <sup>-2</sup>	10,19	3,19.10 <sup>-1</sup>	325,90	212,75	0,58	1,36	122,52
	2	Pb <sup>2+</sup>	5,03	1,11.10 <sup>-1</sup>	10,21	9,52.10 <sup>-2</sup>	287,50	203,09	0,61	1,55	123,49
	3	Ni <sup>2+</sup>	5,15	2,00.10 <sup>-2</sup>	10,11	7,64.10 <sup>-3</sup>	313,24	210,56	0,59	1,43	123,84
2	4	Pb <sup>2+</sup>	5,17	4,36.10 <sup>-2</sup>	10,34	2,25.10 <sup>-2</sup>	302,30	217,00	0,61	1,59	133,30
	5	Cd <sup>2+</sup>	5,04	8,72.10 <sup>-2</sup>	9,70	8,08.10 <sup>-2</sup>	281,91	193,45	0,60	1,48	115,40
	6	Cd <sup>2+</sup>	5,04	8,28.10 <sup>-2</sup>	10,44	5,11.10 <sup>-2</sup>	307,71	208,39	0,59	1,45	123,19
3	7	Pb <sup>2+</sup>	5,16	8,66.10 <sup>-2</sup>	10,37	6,08.10 <sup>-2</sup>	330,41	216,85	0,58	1,37	125,38
	8	Todos	4,98	2,93.10 <sup>-2</sup>	10,63	3,51.10 <sup>-2</sup>	310,95	207,26	0,58	1,41	121,17
	9	Cr <sup>3+</sup>	5,05	1,04.10 <sup>-2</sup>	10,31	3,77.10 <sup>-2</sup>	302,20	206,68	0,60	1,47	122,98
4	10	Ni <sup>2+</sup>	5,23	6,06.10 <sup>-2</sup>	10,33	8,66.10 <sup>-3</sup>	321,61	221,92	0,60	1,49	132,88
	11	Todos	5,08	1,03.10 <sup>-1</sup>	10,25	6,14.10 <sup>-2</sup>	315,05	208,02	0,58	1,38	120,80
	12	Cd <sup>2+</sup>	4,99	8,13.10 <sup>-2</sup>	9,95	2,52.10 <sup>-2</sup>	287,80	194,78	0,59	1,44	115,10
5	13	Cr <sup>3+</sup>	5,15	5,01.10 <sup>-2</sup>	9,63	2,08.10 <sup>-1</sup>	310,28	200,54	0,57	1,33	114,63
	14	Cr <sup>3+</sup>	5,15	3,82.10 <sup>-2</sup>	10,13	6,81.10 <sup>-2</sup>	321,43	211,08	0,58	1,37	122,09
	15	Todos	4,85	5,01.10 <sup>-2</sup>	10,28	3,28.10 <sup>-2</sup>	312,91	189,66	0,54	1,19	103,02

O equipamento de coluna utilizado para os ensaios, apresentado na figura 2, permite ensaiar até três corpos de prova simultaneamente, com fluxo ascendente. A aleatorização dos ensaios foi realizada através de software, com três repetições, observando-se o limite de ensaios simultâneos permitidos através da capacidade total do equipamento.

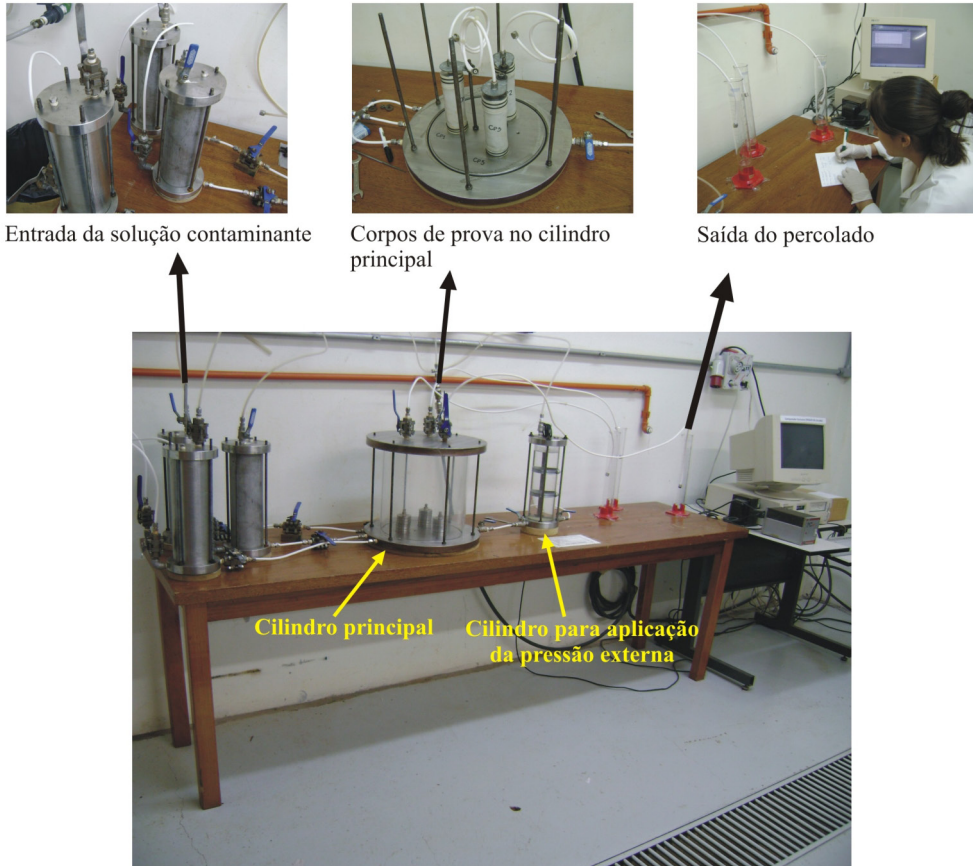


Figura 2. Equipamento de coluna do laboratório de geotecnia.

Para iniciar o ensaio de coluna, primeiramente, os corpos de prova recebem uma membrana e uma identificação para, então, serem alocados no cilindro principal do equipamento de coluna, conforme pode ser visualizado no detalhe da figura 2.

As soluções contaminantes foram preparadas em  $\text{pH} = 4,5$  a partir do padrão dos metais cromo, cádmio, níquel e chumbo, sob a concentração total de  $5 \text{ mg/L}$  para as soluções monoespécie e de  $20 \text{ mg/L}$  para as soluções multiespécie. As soluções contaminantes foram preparadas imediatamente antes de cada ensaio, evitando-se, assim, a precipitação dos metais e obedecendo à ordem de execução e aleatorização dos ensaios.

Após a correta alocação dos corpos de prova e das soluções contaminantes no equipamento de coluna, as pressões interna (20kPa) e externa (40kPa) são aplicadas e o ensaio é iniciado.

Uma vez iniciado o ensaio de coluna, a solução contaminante é percolada pelo corpo de prova na quantidade de dois volumes de vazios: o primeiro é recolhido na saída do equipamento de coluna, através das provetas, e o segundo volume de vazios permanece no interior do corpo de prova. A quantidade de solução contaminante, que foi percolada em cada corpo de prova, pode ser conferida na tabela 2. O tempo médio para a percolação das soluções contaminantes para cada ensaio totalizou 30 minutos.

Ao encerrar o ensaio, as pressões internas e externas são retiradas para, então, ocorrer a liberação dos corpos de prova do equipamento. Após a retirada da membrana dos corpos de prova, estes foram divididos em cinco camadas de aproximadamente 2 cm de altura e enumerados de acordo com o fluxo (ascendente), como representado na figura 3.

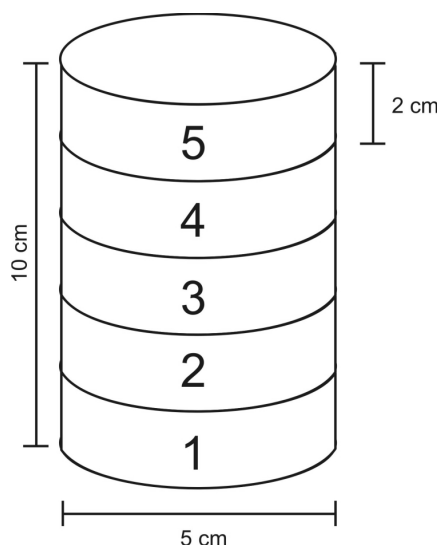


Figura 3. Esquema para corte e identificação das camadas do corpo de prova.

As camadas dos corpos de prova foram submetidas ao método 3050B (USEPA, 1996) de extração. Nesse método, uma porção de cada camada foi aquecida por 24 horas em estufa, à aproximadamente 100°C. Em seguida, 1 g solo foi medido em balança analítica e submetido ao método, passando pelas seguintes etapas:

1ª Etapa: Adição de  $\text{HNO}_3$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . Temperatura: até  $95^\circ\text{C}$ . Tempo: 10 a 15 minutos.

2ª Etapa: Adição de  $\text{HNO}_3$ . Temperatura: até  $95^\circ\text{C}$ . Tempo: 2 horas e 30 minutos.

3ª Etapa: Adição de  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Temperatura: até  $95^\circ\text{C}$ . Tempo: 2 horas.

4ª Etapa: Adição de  $\text{HCl}$ . Temperatura: até  $95^\circ\text{C}$ . Tempo: 15 minutos.

Ao término da 4ª etapa, a filtragem foi realizada, utilizando-se papel filtro nº 42, em equipamento de filtragem a vácuo. O filtrado foi transferido para balão volumétrico de 50mL, completado o volume com água destilada e transferido para frasco de vidro do tipo *snap cap*, devidamente identificado e enviado para a análise no Laboratório de Solos da Universidade de Passo Fundo, em equipamento de espectrofotometria de absorção atômica.

O Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo foi criado para dar suporte às atividades de ensino e pesquisa e presta serviço à comunidade através de análises das propriedades físico-hídrico-mecânicas de solos e substratos e da condução de inúmeros projetos de pesquisa.

No equipamento de espectrofotometria de absorção atômica, primeiramente, é feita a leitura de uma curva padrão, previamente preparada, compreendendo os pontos com as seguintes concentrações 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 mg/L de cada metal. Após, cada amostra é submetida ao método 3050B (USEPA, 1996) e à leitura no equipamento. Os resultados obtidos, através da leitura no equipamento, geram respostas em absorbância de cada camada submetida ao método. Esses resultados são plotados em forma de gráfico e sua regressão linear é utilizada para encontrar os valores correspondentes à concentração de cada amostra.

Amostras do solo natural também foram submetidas ao método 3050B de extração e enviadas para análise em laboratório. Os valores obtidos para o solo natural foram utilizados para descontar dos ensaios, com as soluções monoespécie e multiespécie, submetidos ao método 3050B de extração.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 3, são apresentados os resultados médios de sorção das camadas, obtidos através da extração pelo método 3050B das amostras do solo natural.

Tabela 3. Resultado experimental de sorção para o solo natural.

Sorção (mg/kg)	Metais			
	Cromo	Cádmio	Níquel	Chumbo
Sol. Monoespécie	62,50	0	27,80	33,80
Sol. Multiespécie	50,10	0	26,60	30,60



Na tabela 3, estão apresentados os valores para a solução monoespécie e multiespécie devido à submissão das amostras do solo natural à leitura de ambas as curvas em equipamento de absorção atômica. Com esses resultados, verifica-se que a leitura em diferentes curvas para a mesma amostra refletiu em diferentes resultados finais para todos os metais, com exceção ao cádmio, que permaneceu inexistente. O comportamento apresentado pelos resultados das soluções monoespécie e multiespécie sugere a existência de influência da presença de outros metais na adsorção do metal pelo solo. Os resultados apresentados pela solução multiespécie atribuíram valores de sorção mais baixos do que os resultados obtidos através da solução monoespécie de metais. Para o metal cromo, a solução monoespécie apresentou sorção cerca de 19% maior e para os metais níquel e chumbo, a diferença ficou em cerca de 4%. Cádmio não apresentou diferença nos valores de sorção entre as soluções contaminantes.

Na tabela 4, são apresentados os resultados de extração para a solução contaminante monoespécie de metais com o metal cádmio, em três repetições, aqui denominadas de  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ . Nestes resultados, o valor referente ao solo natural já foi descontado. Através destes resultados, é possível observar um comportamento decrescente ao passar de uma camada a outra nas repetições  $R_1$  e  $R_2$ , porém o mesmo não ocorre em  $R_3$ . Contudo, na média das três repetições, o comportamento decrescente é novamente evidenciado. Ao observar a média dos resultados, a primeira camada apresenta valor de sorção cerca de 70% maior que o valor de sorção da última camada do corpo de prova. Esse resultado mostra que, para o solo em estudo, a sorção nas primeiras camadas é relativamente mais alta do que a sorção das últimas camadas, evidenciando o comportamento decrescente ao passar de uma camada a outra devido à maior retenção de metais na primeira camada.

Tabela 4. Resultado de sorção para o ensaio monoespécie com o metal cádmio.

Metal	Camada	Sorção (mg/kg) $R_1$	Sorção (mg/kg) $R_2$	Sorção (mg/kg) $R_3$	Média	Desvio Padrão
Cádmio	1	8,20	8,53	3,76	6,83	2,66
	2	4,19	4,19	3,83	4,07	0,21
	3	3,13	2,78	4,76	3,56	1,06
	4	2,47	2,64	3,00	2,70	0,27
	5	2,31	2,16	1,79	2,09	0,27

Na tabela 5, são apresentados os resultados da extração pelo método 3050B para os ensaios submetidos à solução contaminante multiespécie, com os valores do solo natural já descontados. Analisando-se as médias dos resultados obtidos de sorção para todos os metais, o comportamento decrescente ao passar de uma camada a outra

é evidenciado na maioria dos casos, exceto na quarta camada do metal chumbo, que apresentou valor mais elevado do que na segunda e terceira camadas.

Ainda analisando a média destes resultados, a primeira camada do metal cromo apresenta valor de sorção cerca de 34% maior que o valor de sorção da última camada para esse metal. Para cádmio, a diferença entre a primeira camada e a última fica cerca de 83%; para níquel, cerca de 99% e para chumbo, aproximadamente 90%. Assim como ocorreu para a solução monoespécie de cádmio, os resultados para as soluções multiespécie de metais também apresentaram valores de sorção na primeira camada superiores quando comparados aos da última camada ensaiada, comportamento esse devido à maior retenção do metal nas primeiras camadas de solo.

Tabela 5. Sorção para os ensaios multiespécie de metais.

Metal	Camada	Sorção (mg/kg) R <sub>1</sub>	Sorção (mg/kg) R <sub>2</sub>	Sorção (mg/kg) R <sub>3</sub>	Média	Desvio Padrão
Cromo	1	18,50*	43,60	45,80	44,70	1,53
	2	5,30*	41,10	45,70	43,40	3,25
	3	4,976*	30,70	44,00	37,30	9,40
	4	3,92*	29,70	40,60	35,10	7,75
	5	0*	22,60	35,90	29,20	9,43
Cádmio	1	9,18	8,85	14,30*	9,01	0,23
	2	4,72	8,13	12,30*	6,42	2,41
	3	3,81	3,64	12,20*	3,72	0,12
	4	2,78	1,66	12,10*	2,22	0,79
	5	1,94	1,06	11,60*	1,50	0,62
Níquel	1	0,89*	6,49	6,09	6,29	0,28
	2	0*	6,44	4,43	5,43	1,42
	3	0*	1,47	1,64	1,55	0,12
	4	0*	1,89	1,62	1,75	0,19
	5	0*	0	0,09	0,045	0,06
Chumbo	1	4,15	16,90	0*	10,50	8,99
	2	1,35	2,07	0*	1,71	0,51
	3	2,07	0	0*	1,03	1,46
	4	3,25	4,61	0*	3,93	0,96
	5	0	2,07	0*	1,03	1,46

\* Valores desconsiderados para as análises

Para Demuelenaere (2004), as análises do solo, após o ensaio de coluna, indicaram que à medida que o contaminante vai sendo percolado pela coluna a sua concentração diminui, isto é, nas primeiras camadas a concentração é maior e a tendência é ir diminuindo até o final do corpo de prova, entrando em conformidade com a maioria dos resultados encontrados por este trabalho em ambas as soluções contaminantes estudadas, inclusive para os metais da solução multiespécie.

Na figura 4, é apresentado um comparativo do comportamento de cádmio em termos de sorção nas camadas submetidas à percolação com a solução monoespécie e multiespécie de metais.

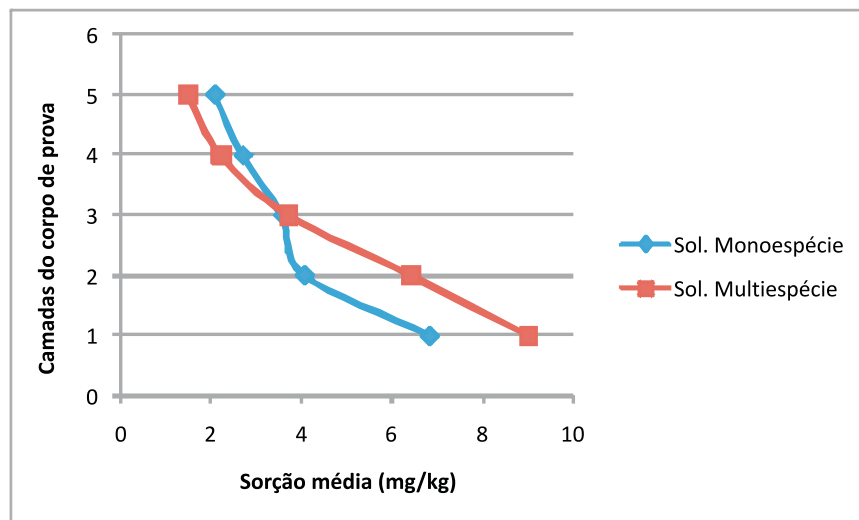


Figura 4. Sorção de cádmio nas camadas em solução monoespécie e multiespécie de metais.

Analisando-se a figura 4, o metal cádmio, quando se encontrava presente individualmente na solução, gerou resultados mais baixos em termos de sorção do que quando estava presente em solução multiespécie. Esse comportamento sugere que, quando o metal cádmio encontra-se de forma individual em solução, tal elemento apresenta maior disponibilidade a ser lixiviado do que quando está presente na solução multiespécie de metais. Tal comportamento evidencia que a presença de outros metais na mesma solução contaminante interferiu nos valores de sorção de cádmio, deixando-o com menor disponibilidade de ser lixiviado do que nos resultados com a solução monoespécie de metais.

Já os resultados para as camadas 4 e 5 dos ensaios sob solução monoespécie apresentaram o comportamento contrário: apresentou valores mais elevados de sorção do que os do ensaio sob solução multiespécie. A diferença apresentada entre os resultados dos ensaios submetidos à solução monoespécie e multiespécie de metais na primeira camada foi de cerca de 24%, sendo o ensaio com a solução contaminante multiespécie o resultado mais elevado. Na última camada, a proporção foi cerca de 28% maior para a solução monoespécie.

Comparando-se os metais submetidos à solução multiespécie de metais, a maior capacidade de retenção no solo em estudo foi observada pelo cromo. Tal comportamento foi observado por Oliveira e Mattiazzo (2001) que atribuíram a imobilidade do cromo à sua presença na forma trivalente ( $\text{Cr}^{3+}$ ), a qual poderia ter sido precipitada como hidróxidos de fórmulas genéricas em meio alcalino ou pouco ácido, ter sido complexado junto a moléculas orgânicas pouco solúveis ou adsorvido à superfície dos minerais.

A ordem de seletividade ao organizar os metais para os resultados das análises com as soluções multiespécie de metais foi a seguinte:  $\text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Ni}$ , sendo o metal cromo o mais retido pelo solo e níquel o mais disponível para lixiviação. Nascentes (2006), através do seu trabalho, argumenta que o comportamento típico é que os metais Pb e Cr apresentem menor mobilidade em solos do que os metais Cd e Ni, confirmando os mesmos comportamentos apresentados pelos resultados do presente estudo.

Para Moreira (2004), a sequência de afinidade mais encontrada no sistema competitivo foi  $\text{Cu} > \text{Cd} > \text{Zn} > \text{Ni}$ . Observando-se os resultados obtidos por Moreira, pode-se comparar que para os metais cádmio e níquel, houve comportamento idêntico no ensaio simultâneo realizado neste trabalho.

Para Lafuente et al. (2008), dentre os metais estudados, todos apresentaram altos valores de adsorção, porém foi observado que Cr e Pb apresentaram maior afinidade com o solo do que Cd, resultando em maior retenção de Cr e Pb e menor retenção para Cd. Os mesmos comportamentos também foram observados por Xiong et al. (2005) e por Zhang e Zheng (2007). Esse comportamento foi observado nos resultados deste trabalho, através da sequência de seletividade obtida para os ensaios simultâneos de metais.

“Segundo Moreira (2004), a competição entre os metais afeta a magnitude da sorção de todos os metais com diminuição, no geral, da sorção máxima dos mesmos. O comportamento observado por Moreira (2004) não foi identificado nos ensaios realizados para o metal cádmio, que apresentou aumento no valor de sorção quando estava presente em solução multiespécie de metais.”

## CONCLUSÕES

De acordo com o objetivo proposto, com os resultados alcançados e com as condições em que o trabalho foi conduzido, algumas conclusões foram obtidas:

- A análise dos resultados, comparando-se os ensaios submetidos à solução monoespécie de metais com os ensaios submetidos à solução multiespécie de metais, só foi pertinente porque ambos os ensaios foram submetidos às mesmas concentrações de metais nas soluções contaminantes e sob o mesmo valor de pH.

- A maior capacidade de retenção de metais no solo em estudo foi observada nos ensaios submetidos à solução multiespécie com o metal cromo e a menor capacidade de retenção foi observada com o metal níquel.

- Os resultados obtidos através deste trabalho mostraram que houve influência da presença de outros metais nos valores de sorção para cádmio, evidenciando-se que quando cádmio estava presente em solução multiespécie, este teve preferência dentre os outros metais em ficar mais retido no solo, apresentando aumento nos valores de sorção.

## REFERÊNCIAS

AZEVEDO, I. C. D. et al. 2005. Determinação de parâmetros de transporte de metais pesados em Latossolo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 9(4):623-630.

BERTORELLI, A.; HARALYI, N. 1998. Geologia do Brasil. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Coord.) **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 584 p.

BUSZEWSKI, B.; KOWALKOWSKI, T. 2006. A new model of heavy metal transport in the soil using nonlinear artificial neural networks. **Environmental Engineering Science**, 23(4):589-595.

DEMUELENAERE, R. G. A. 2004. **Caracterização de propriedades de transporte de metais pesados em solos residuais do Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 120p.

DIELS, L.; VAN DER LELIE, N.; BASTIAENS, L. 2002. New developments in treatment of heavy metal contaminated soils. **Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology**, 1:75-82.

ELZAHABI, M., YONG, R. N. 2001. pH influence on sorption characteristics of heavy metal in the vadose zone. **Engineering Geology**, 60:61-68.

LAFUENTE, A. L. et al. 2008. Mobility of heavy metals in poorly developed carbonate soils in the Mediterranean region. **Geoderma**, 145:238-244.

- MARTINS, J. L. 1984. **Toxidez de cádmio e chumbo para plantas e microorganismos do solo**. 1984. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 150p.
- MEURER, E. J. 2006. **Fundamentos de química do solo**. 3. ed. Porto Alegre: Evangraf, 285p.
- MOREIRA, C. S. 2004. **Adsorção competitiva de cádmio, cobre, níquel e zinco em solos**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, 108p.
- NASCENTES, R. 2006. **Estudo da mobilidade de metais pesados em um solo residual compactado**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Viçosa, 181p.
- OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E. 2001. Mobilidade de metais pesados em um latossolo amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agrícola**, **58**:807-812.
- PEDROTTI, A.; MELLO JÚNIOR, A. V. 2009. **Avanços em ciência do solo: a física do solo na produção agrícola e qualidade ambiental**. São Cristóvão, Aracajú: Editora UFS, Fapitec, 212 p.
- RANA, S. V. S. 2007. **Environmental pollution: health and toxicology**. Merrut – India: Alpha Science International, 269p.
- SANGUI, R.; SASI, K. S. 2001. Pesticides and heavy metals in agricultural soil of Kanpur, India. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, **67**:446–454.
- STRECK, E. V. et al. 2008. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 222p.
- USEPA, U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1996. Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils. Disponível em: <<http://www.epa.gov/SW-846/pdfs/3050b.pdf>>. Acesso em: 02. mar. 2008.
- USEPA, U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2004. Cleaning up the Nation's waste sites: markets and technology trends. Disponível em: <<http://www.clu-in.org/download/market/2004market.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2011.
- WHO, World Health Organization. 1992. **Environmental Health Criteria 135: Cadmium – Environmental Aspects**. Geneva: Who Library Cataloguing in Publication Data, 156p.
- XIONG, X. et al. 2005. Competitive sorption of metals in water repellent soils: implications for irrigation recycled water. **Australian Journal of Soil Research**, **43**:351-356.
- ZHANG, M.; ZHENG, S. 2007. Competitive Adsorption of Cd, Cu, Hg and Pb by Agricultural Soils of the Changjiang and Zhujiang Deltas in China. **Journal of Zhejiang University SCIENCE A**, **8**:1808-1815.