

FÁBIO RIBEIRO PIRES

**SELEÇÃO DE ESPÉCIES PARA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS
CONTAMINADOS COM TEBUTHIURON**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2003

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

P667s
2003

Pires, Fábio Ribeiro, 1975-

Seleção de espécies para fitorremediação de solos contaminados com tebuthiuron / Fábio Ribeiro Pires. – Viçosa : UFV, 2003.

65p. : il.

Orientador: Caetano Marciano de Souza

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa

1. Plantas - Tolerância a herbicidas. 2. Solos - Fitorremediação. 3. Solos - Poluição. 4. Adubação verde 5. Tebutiuron. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 632.954

CDD 20.ed. 632.954

FÁBIO RIBEIRO PIRES

**SELEÇÃO DE ESPÉCIES PARA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS
CONTAMINADOS COM TEBUTHIURON**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 17 de outubro de 2003.

Prof. Antonio Alberto da Silva
(Conselheiro)

Profa. Maria Eliana L. R. Queiroz
(Conselheira)

Prof. Juraci Alves de Oliveira

Prof. Fernando Barboza Egreja Filho

Prof. Caetano Marciano de Souza
(Orientador)

À minha querida esposa Catherine.

Aos meus pais Elizeu e Eunice.

Ao meu irmão Leandro.

AGRADECIMENTO

A Deus, Pai e Criador.

A Jesus, mestre e amigo de todas as horas.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), por intermédio do Departamento de Fitotecnia, pela oportunidade concedida e pela acolhida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Caetano Marciano de Souza, pela orientação, pela confiança, pelo apoio e pela amizade.

Aos professores Antonio Alberto da Silva e Maria Eliana Lopes Ribeiro de Queiroz, pelas conselhos, pelo apoio e pela amizade durante as diversas etapas deste trabalho.

Aos professores Paulo Roberto Cecon e Juraci Alves de Oliveira, pela colaboração e pelos oportunos conselhos.

Ao professor e amigo Fernando Egreja, pelas oportunas sugestões.

À empresa de sementes Piraí, na pessoa do engenheiro-agrônomo Sérgio Zeferino Batista, pelo material gentilmente cedido para a realização do experimento.

Aos funcionários da Estação Experimental Diogo Alves dos Santos (Vale da Agronomia), pela inestimável colaboração.

À secretária e amiga Mara, pelos serviços prestados, pelos momentos de descontração e pela amizade.

Ao técnico Luiz Henrique, pela impagável contribuição nas diversas etapas deste trabalho.

Aos laboratoristas do Departamento de Fitotecnia Domingos Sávio e Itamar, pelo apoio na condução da pesquisa e pela amizade.

Aos amigos Sérgio, Adriano, Rodrigo Sobreira, José Barboza, Marlon, André Guarçoni, Ricardo, Patrícia, Rafael, Carlos Shigeaky, Edinho, Diolino, entre tantos outros, por termos compartilhado bons e difíceis momentos.

A todos os ótimos e sinceros amigos que fiz, dentro e fora da UFV, e que levarei para sempre comigo.

À minha esposa Catherine, pela paciência, pela tolerância, pelo apoio e acima de tudo pelo amor, que tornaram possíveis a conclusão desta etapa.

Aos meus pais Elizeu e Eunice e ao meu irmão Leandro, pelo apoio incondicional e, acima de tudo, pelo afeto e encorajamento.

Aos meus sogros Sidney e Catharina e aos cunhados Sávio e Aline, pelo apoio e pela confiança.

BIOGRAFIA

FÁBIO RIBEIRO PIRES, filho de Elizeu Pires de Araújo e Eunice Ribeiro Pires, nasceu em Alegre, Espírito Santo, no dia 18 de março de 1975.

Em março de 1993, iniciou o curso de Engenharia Agrônômica na Universidade Federal do Espírito Santo, em Alegre-ES, graduando-se em agosto de 1995.

Nesse mesmo mês e ano, ingressou no Programa de Mestrado em Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, submetendo-se à defesa de tese em janeiro de 2000.

Em março de 2000, iniciou o curso de Doutorado em Fitotecnia na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, submetendo-se à defesa de tese em 2003.

ÍNDICE

	Página
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
LITERATURA CITADA.....	3
 SELEÇÃO DE PLANTAS COM POTENCIAL PARA FITOR- REMEDIÇÃO DE TEBUTHIURON.....	 4
RESUMO	4
ABSTRACT	5
INTRODUÇÃO	6
MATERIAL E MÉTODOS.....	8
RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
CONCLUSÕES	24
LITERATURA CITADA	24
 FITORREMEDIÇÃO DE TEBUTHIURON EM SOLO POR ESPÉCIES CULTIVADAS PARA ADUBAÇÃO VERDE.....	 27
RESUMO	27
ABSTRACT	28
INTRODUÇÃO	29
MATERIAL E MÉTODOS.....	31
RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
CONCLUSÕES	46
LITERATURA CITADA	46

ATIVIDADE RIZOSFÉRICA DE ESPÉCIES COM POTENCIAL PARA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS COM TEBUTHIURON	49
RESUMO	49
ABSTRACT	50
INTRODUÇÃO	51
MATERIAL E MÉTODOS.....	53
RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
CONCLUSÕES	61
LITERATURA CITADA	62
2. CONCLUSÕES.....	65

RESUMO

PIRES, Fábio Ribeiro, D.S., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2003.
Seleção de espécies para fitorremediação de solos contaminados com tebuthiuron. Orientador: Caetano Marciano de Souza. Conselheiros: Antonio Alberto da Silva, Maria Eliana Lopes Ribeiro de Queiroz e Paulo Roberto Cecon.

O tebuthiuron é um herbicida muito utilizado na cultura da cana-de-açúcar. Por apresentar longo efeito residual no solo, com frequência tem-se observado *carryover* em culturas suscedâneas, além do risco de contaminação de lençóis de água subterrâneos. Por isso, trabalhos visando a identificação de plantas que promovam despoluição de solos contaminados com esse herbicida, são uma alternativa interessante, em razão da preocupação ambiental e agrícola que o tebuthiuron gera. Com esse objetivo foram desenvolvidos três experimentos em casa de vegetação. No primeiro avaliou-se a tolerância de 20 espécies vegetais ao tebuthiuron. Dentre elas, as sete que apresentaram maior tolerância ao tebuthiuron foram testadas, no segundo experimento, quanto à capacidade de reduzir a concentração desse herbicida no solo, pela técnica de bioensaio no próprio vaso. O terceiro experimento teve como objetivo inferir a contribuição rizosférica na fitorremediação de tebuthiuron promovida pelas espécies mais promissoras. Para isso, avaliou-se a evolução de CO₂ de solo rizosférico de

Canavalia ensiformis, *Estizolobium deeringianum*, *Pennisetum typhoides*, *Estizolobium aterrimum* e da testemunha (solo sem planta). As espécies que apresentaram maior tolerância ao tebuthiuron (até a 1,0 kg ha⁻¹ – dose média recomendada) foram *E. aterrimum*, *E. deeringianum*, *C. ensiformis*, *Lupinus albus* e *P. typhoides*, enquanto *Cajanus cajan* e *Dolichos lablab* exibiram tolerância intermediária. Dentre essas espécies, as que melhor fitorremediaram esse herbicida no solo foram *Canavalia ensiformis* e *L. albus*. O cultivo dessas espécies em solos tratados com até 1,0 kg ha⁻¹ de tebuthiuron possibilitou desenvolvimento e crescimento das espécies indicadoras *Avena strigosa* e *Glycine max* semeadas 60 dias após a aplicação do herbicida. A contribuição rizosférica na fitorremediação de tebuthiuron - com exceção de *C. ensiformis*, que apresentou maior taxa de evolução de CO₂ - não foi relevante.

ABSTRACT

PIRES, Fábio Ribeiro, D.S., Universidade Federal de Viçosa, October 2003.
Selection of species to phytoremediation of tebuthiuron-polluted soil.
Adviser: Caetano Marciano de Souza. Committee Members: Antonio Alberto da Silva, Maria Eliana Lopes Ribeiro de Queiroz and Paulo Roberto Cecon.

The tebuthiuron is an herbicide very utilized in sugar-cane crop. Because it presents long soil residual effect, it is observed *carryover* in crops cultivate on succession, besides the risk of contamination of underground sheets of water. Because this, works aiming the plant identification that promote depollution of herbicide polluted soils, are interesting alternatives in reason of the environmental and agricultural concern that the tebuthiuron generates. With this objective, three experiments were developed at green house. In the first one, it evaluated the tolerance to tebuthiuron of 20 vegetal species. Among them, the seven that presented larger tolerance to the tebuthiuron were tested in the second experiment, in relation to the capacity to reduce the herbicide concentration in the soil by the bioassay technique in the own vase. The third experiment objective was to infer the rhizospheric contribution in the tebuthiuron phytoremediation promoted by the efficient species. For that, the CO₂ evolution in rhizospheric soil of *Canavalia ensiformis*, *Estizolobium deeringianum*,

Pennisetum typhoides, *Estizolobium aterrimum* and control treatment (soil without plant) was evaluated. *E. aterrimum*, *E. deeringianum*, *C. ensiformis*, *Lupinus albus* and *P. typhoides* were the species that presented larger tolerance to the tebuthiuron (even to 1,0 kg ha⁻¹ – recommended average dose), while *Cajanus cajan* and *Dolichos lablab* presented intermediary tolerance. Among those species, the ones that better phytoremediated that herbicide in the soil were *C. ensiformis* and *L. albus*. The cultivation of those species in treated soils with up to 1,0 kg ha⁻¹ of tebuthiuron enabled the development and the growth of the indicative species *Avena strigosa* and *Glycine max* that were sowed 60 days after the herbicide application. The rhizospheric contribution in the tebuthiuron phytoremediation – except for *C. ensiformis*, that presented larger evolution rate of CO₂ – it was not important.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a destinação dos diferentes xenobióticos aplicados no solo tem despertado e recebido maior atenção da comunidade científica, que busca, além de orientar seu emprego de forma adequada, racional e eficiente, permitir que sua ação cause o mínimo de danos ao ambiente.

As moléculas herbicidas enquadram-se entre as substâncias mais utilizadas na atividade agropecuária, sendo empregadas em áreas de grande extensão, possibilitando o controle efetivo de espécies que interferem negativamente na cultura. Herbicidas com longo residual no solo são desejáveis para culturas que possuem longo período crítico de interferência. No entanto, do ponto de vista ambiental, representam risco, pois, quanto maior a persistência no solo, maior a possibilidade de lixiviação dessas moléculas ou de seus metabólitos para camadas mais profundas no perfil do solo, podendo atingir o lençol de água subterrâneo (Dornelas de Souza et al., 2001).

Dentre os herbicidas potencialmente problemáticos encontra-se o tebuthiuron, largamente empregado na cultura da cana-de-açúcar, cujo efeito residual no solo varia de 12-14 meses (Blanco e Oliveira, 1987), podendo intoxicar culturas sensíveis cultivadas em rotação com a cana. Além disso, apresenta elevada solubilidade em água (2.500 mg L^{-1} a 25°C), o que favorece sua movimentação no solo (Rodrigues e Almeida, 1998).

Dentre as alternativas para despoluir áreas contaminadas não só por herbicidas mas também por outros compostos orgânicos, tem-se optado por soluções que englobam: eficiência na descontaminação, simplicidade na execução, tempo demandado pelo processo e menor custo (Ferro et al., 1994). Nesse contexto, cresce o interesse pela utilização da biorremediação, caracterizada como técnica que objetiva descontaminar solo e água por meio da utilização de organismos vivos, como microrganismos e plantas. Quando se empregam plantas para detoxificar ambientes contaminados com poluentes orgânicos e inorgânicos, dá-se o nome de fitorremediação. Esta técnica explora a habilidade das plantas em estimular a microbiota a ela associada, para que promova degradação rizosférica, bem como a tolerância que exibem ao xenobiótico, o que possibilita a extração e a metabolização do contaminante pela própria planta (Cunningham et al., 1996).

Como a pesquisa envolvendo a técnica de fitorremediação é ainda muito recente, apesar de já ser praticada há séculos, torna-se necessário a identificação de plantas que proporcionem a fitorremediação de herbicidas de longo efeito residual, como o tebuthiuron. Estas plantas devem estar adaptadas às condições edafoclimáticas da região e ser de fácil cultivo e controle, para não se tornarem problema na área. Aliada a essas características, a seleção de espécies que apresentam benefícios agronômicos, como adubos verdes, seria, nesse caso, melhor aceita e desejável nos programas de fitorremediação.

Procurando soluções para a descontaminação do solo, e em razão das limitadas informações sobre a possibilidade de fitorremediar solos contaminados com tebuthiuron, desenvolveu-se esse trabalho com o objetivo de selecionar plantas tolerantes e com potencial para fitorremediação de solos contaminados por esse herbicida.

Os artigos a seguir foram formatados com base nas normas da revista Planta Daninha.

LITERATURA CITADA

BLANCO, J. G.; OLIVEIRA, D. A. Persistência de herbicidas em Latossolo Vermelho-Amarelo em cultura de cana-de-açúcar. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 22, p. 681-687, 1987.

CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Adv. Agron.**, v. 56, p. 55-114, 1996.

DORNELAS DE SOUZA, M.; BOEIRA, R. C.; GOMES, M. A. F.; FERRACINI, V. L.; MAIA, A. H. N. Adsorção e lixiviação de tebuthiuron em três tipos de solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 25, p. 1053-1061, 2001.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 4. ed. Londrina: Edição dos Autores, 1998. 648 p.

FERRO, A. M.; SIMS, R. C.; BUGBEE, B. Hycrest crested wheatgrass accelerates the degradation of pentachlorophenol in soil. **J. Environ. Qual.**, v. 23, p. 272-279, 1994.

SELEÇÃO DE PLANTAS COM POTENCIAL PARA FITORREMEDIAÇÃO DE TEBUTHIURON

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo selecionar espécies tolerantes ao tebuthiuron, visando utilizá-las em programas de fitorremediação de solos contaminados com esse herbicida. O trabalho foi conduzido em casa de vegetação, em vasos contendo 3 dm³ de solo de textura argilo-arenosa, com 2,18 dag kg⁻¹ de matéria orgânica. O experimento foi montado segundo um esquema fatorial 20 x 4 x 4 (20 espécies, 4 doses e 4 épocas de avaliação), no delineamento de blocos ao acaso, com três repetições. As espécies avaliadas foram: *Avena strigosa*, *Amaranthus hybridus*, *Tagetes minuta*, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Chamaesyce hyssopifolia*, *Chamaesyce hirta*, *Vicia sativa*, *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformis*, *Helianthus annuus*, *Dolichos lablab*, *Pennisetum typhoides*, *Brassica rapa*, *Estizolobium deeringianum*, *Estizolobium aeterrimum*, *Raphanus raphanistrum*, *Raphanus sativus* var. *oleifera*, *Lupinus albus* e *Crotalaria incana*. As quatro doses de tebuthiuron (0,0; 0,5; 1,0; e 2,0 kg ha⁻¹) foram aplicadas em pré-emergência, sendo as avaliações realizadas aos 15, 30, 45 e 60 dias após a semeadura (DAS). Foram avaliadas a fitotoxicidade do herbicida, a altura de plantas e a biomassa seca da parte aérea, das raízes e do total da planta. As espécies que demonstraram tolerância ao tebuthiuron, até a dose comercial (1,0 kg ha⁻¹), foram *E. aeterrimum*, *E. deeringianum*, *C. ensiformis*, e *P. typhoides*, indicando potencial de utilização para posteriores estudos de fitorremediação de tebuthiuron em solo. *C. cajan*, *D. lablab* e *L. albus* exibiram tolerância ao tebuthiuron na dose de 0,5 kg ha⁻¹. Estas espécies podem também ser de interesse para estudos envolvendo a fitorremediação para este herbicida, presente no solo em baixas concentrações.

Palavras-chave: seletividade, fitotoxicidade, biorremediação, adubos verdes, plantas daninhas.

SELECTION OF POTENCIAL PLANTS TO TEBUTHIURON PHYTOREMEDIATION

ABSTRACT

This work aimed to select tolerant species to tebuthiuron, aiming to use them in phytoremediation programs of soil polluted by this herbicide. The work was conducted at green house, in vases with 3 dm³ of clay-sandy texture soil, with 2,18 dag kg⁻¹ of organic matter. The experiment was according to the factorial design 20 x 4 x 4 (20 species, 4 doses and 4 evaluation time), in randomized blocks design, with three replications. The evaluated species were: *Avena strigosa*, *Amaranthus hybridus*, *Tagetes minuta*, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Chamaesyce hysopifolia*, *Chamaesyce hirta*, *Vicia sativa*, *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformis*, *Helianthus annuus*, *Dolichos lablab*, *Pennisetum typhoides*, *Brassica rapa*, *Estizolobium deeringianum*, *Estizolobium aeterrimum*, *Raphanus raphanistrum*, *Raphanus sativus* var. *oleifolius*, *Lupinus albus* and *Crotalaria incana*. The tebuthiuron at 0,0; 0,5; 1,0; and 2,0 kg ha⁻¹ was sprayed in pre-emergence, being evaluated at 15, 30, 45 and 60 days after planting. The herbicide phytotoxicity, the plants height and the dry matter of the aerial part, the roots and of all plant were evaluated. The species *E. aeterrimum*, *E. deeringianum*, *C. ensiformis*, and *P. typhoides* demonstrate tolerance to the tebuthiuron at 1,0 kg ha⁻¹, indicating potential utilization to posterior soil tebuthiuron phytoremediation studies. *C. cajan*, *D. lablab* and *L. albus* presented tolerance to tebuthiuron at 0,5 kg ha⁻¹. These species can also be interesting to studies involving phytoremediation to this herbicide, in low concentrations in soil.

Key word: selectivity, Phytotoxicity, bioremediation, green fertilizers, and weeds.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de moléculas herbicidas com longo efeito residual possibilitou o controle efetivo de plantas daninhas por maior período de tempo e a redução do número de aplicações. No entanto, essa residualidade vem provocando fitotoxicidade em culturas sensíveis plantadas após a utilização desses herbicidas (*carryover*) (Bovey et al., 1982). Além disso, com o uso de herbicidas de longo residual no solo, há maior probabilidade de ocorrência de lixiviação de suas moléculas originais ou de seus metabólitos para camadas mais profundas no perfil do solo, com a conseqüente contaminação do aquífero subterrâneo (Dornelas de Souza et al., 2001).

Dentre os herbicidas que apresentam longo residual no solo destaca-se o tebuthiuron, N-{5-(1,1-dimetiletil)-1,3,4-tiadiazol-2-il}-n,n'-dimetiluréia (Figura 1), recomendado para uso em pré-emergência na cultura da cana-de-açúcar. Sua persistência no solo pode variar de 11 a 14 meses (Blanco e Oliveira, 1987), determinada em solo Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa, no estado de São Paulo, em lavouras de cana-de-açúcar; de 15 a 25 meses (Meyer e Bovey, 1988) em solo argiloso do Texas (EUA); ou mesmo estender-se até 7,2 anos, quando simulada a reunião de todas condições ambientais que favoreciam sua persistência (Emmerich et al., 1984). Além disso o tebuthiuron apresenta elevada mobilidade em solos com baixos teores de argila e de carbono orgânico, sendo, portanto, fonte potencial para contaminação dos aquíferos, principalmente como resultado de aplicações seqüenciais ao longo dos anos, na mesma área (Cerdeira et al., 1999). Tanto a possibilidade de *carryover* em culturas sucessivas à cana como o de contaminação de aquíferos podem ser amenizados pelo emprego de técnicas que acelerem a retirada desse composto do solo, promovendo sua descontaminação. Dentre essas técnicas, destaca-se a utilização de plantas como organismos descontaminantes de solos e água, denominada fitorremediação, que pode ser usada em áreas contaminadas com substâncias orgânicas e inorgânicas (Cunningham et al., 1996).

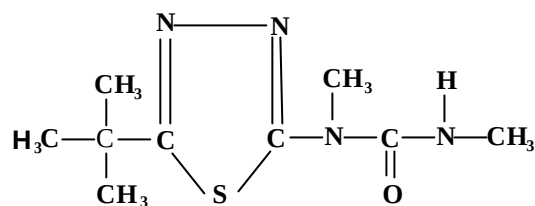


Figura 1 – Estrutura química do tebuthiuron.

A fitorremediação baseia-se na tolerância que algumas espécies exibem a determinados produtos. Essa tolerância pode ser resultante de processos como a translocação diferencial (maior ou menor) de compostos orgânicos para outros tecidos da planta com subsequente volatilização, a degradação parcial ou completa e a transformação em compostos não-tóxicos, combinados e, ou, ligados nos tecidos das plantas (Accioly e Siqueira, 2000; Scramin et al., 2001). Em geral, a maioria dos compostos orgânicos passa por alguma transformação nas células das plantas antes de serem isolados em vacúolos ou ligarem-se a estruturas celulares insolúveis, como a lignina (Macek et al., 2000).

Na fitoestimulação, que é considerada uma forma de fitorremediação, ocorre a liberação de exsudatos radiculares, há o estímulo à atividade microbiana, que degrada o composto no solo, caracterizando, em algumas plantas, a aptidão rizosférica para a biorremediação de compostos tóxicos (Cunningham et al., 1996).

Diversos trabalhos relatam o efeito positivo da utilização de plantas na descontaminação do solo (Anderson e Coats, 1995; Kruger et al., 1997; Hoagland et al., 1997). No Brasil, a pesquisa nessa área é ainda incipiente, não havendo relatos sobre o uso da fitorremediação de tebuthiuron.

A seleção de plantas que apresentam tolerância ao tebuthiuron é o primeiro passo na seleção de espécies potencialmente fitorremediadoras, e tem sido empregada no estudo da fitorremediação de diversos contaminantes orgânicos (Rogers et al., 1996; Wiltse et al., 1998; Liste e Alexander, 1999). Entretanto, deve-se evitar a utilização de espécies de difícil controle e, se possível, selecionar aquelas que promovam outros benefícios ao solo, como é o caso das

que são utilizadas como adubo verde ou para cobertura do solo. Contudo, existem poucas informações sobre a tolerância dessas espécies a herbicidas.

Quanto à seletividade do tebuthiuron a adubos verdes, Dal Piccolo e Christoffoleti (1985) constataram inibição no crescimento de *Crotalaria juncea* até 13 meses após a aplicação desse herbicida. Todavia, em solo argilo-arenoso, Dal Piccolo et al. (1986) observaram que aplicações de tebuthiuron ($0,96 \text{ kg ha}^{-1}$) e tebuthiuron + diuron ($0,96 + 0,80 \text{ kg ha}^{-1}$), com intervalo de 364 dias entre a aplicação e o plantio reduziram a produção do feijão em até 67%, em relação ao tratamento testemunha. Resultados semelhantes foram também relatados por Approbato Filho et al. (1988), os quais observaram - nas culturas de feijão, amendoim e soja, semeadas dois anos após a aplicação de tebuthiuron na cultura da cana - inibição do crescimento de feijão e redução no rendimento de grãos da soja e do amendoim.

Buscando alternativas (plantas) para redução do período residual do tebuthiuron no solo, este trabalho teve como objetivo selecionar espécies vegetais tolerantes ao tebuthiuron, visando utilizá-las em programas de fitorremediação.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram escolhidas 20 espécies de plantas com provável potencial para tolerarem o herbicida tebuthiuron e serem empregadas na fitorremediação do solo. Nesta escolha foram selecionadas, além de plantas daninhas classificadas como tolerantes por Lorenzi et al. (2000), espécies que apresentam valor agrícola/econômico, visando seu aproveitamento na agricultura. As espécies selecionadas foram: aveia-preta (*Avena strigosa*), caruru-roxo (*Amaranthus hybridus*), cravo-de-defunto (*Tagetes minuta*), crotalária-juncea (*Crotalaria juncea*), crotalária-espectabilis (*Crotalaria spectabilis*), erva-andorinha (*Chamaesyce hyssopifolia*), erva-de-santa-luzia (*Chamaesyce hirta*), ervilhaca (*Vicia sativa*), feijão-guandu (*Cajanus cajan*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), girassol (*Helianthus annuus*), lablabe (*Dolichos lablab*), milheto (*Pennisetum typhoides*), mostarda (*Brassica rapa*), mucuna-anã

(*Estizolobium deeringianum*), mucuna-preta (*Estizolobium aterrimum*), nabiça (*Raphanus raphanistrum*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), tremoço-branco (*Lupinus albus*) e xiquexique (*Crotalaria incana*).

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal de Viçosa. Como substrato, utilizou-se material de solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo, de textura argilo-arenosa, coletado sob vegetação de mata secundária, na profundidade de 0-20 cm, e peneirado em malha de 4 mm. Sua caracterização física e química está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição físico-química do material de solo utilizado no experimento^{1/}

Análise Granulométrica (dag kg ⁻¹)										
Argila		Silte		Areia Fina		Areia Grossa		Classificação Textural		
39		11		17		33		Argilo-arenosa		
Análise Química										
pH H ₂ O	P	K ⁺	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H + Al	CTC _{total}	V	M	MO
	(mg dm ⁻³)		(cmol _c dm ⁻³)					(%)		(dag kg ⁻¹)
5,8	1,4	123	0,0	3,8	1,4	4,3	9,81	56	0	2,18

^{1/} Análises realizadas nos Laboratórios de Análises Físicas e Químicas de Solo do Departamento de Solos da UFV, segundo a metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA (1997).

O experimento foi montado em esquema fatorial 20 x 4 x 4 (20 espécies vegetais, 4 doses de tebuthiuron e 4 épocas de avaliação), totalizando 320 tratamentos, conduzidos no delineamento de blocos ao acaso, com três repetições. A unidade experimental foi composta por um vaso de polietileno, contendo 3 dm³ de solo. Após o enchimento dos vasos com solo, procedeu-se a aplicação de tebuthiuron (marca comercial Combine 500 SC), em pré-emergência, nas doses de 0,0; 0,5; 1,0 e 2,0 kg ha⁻¹, simulando diferentes níveis de contaminação do solo. Para a aplicação do herbicida utilizou-se pulverizador de precisão, pressurizado com gás carbônico (CO₂) e bicos 110.03 aplicando-se o equivalente a 260 L ha⁻¹ de calda.

A semeadura das plantas remediadoras foi realizada um dia após a aplicação de tebuthiuron, na densidade de cinco plantas por vaso, sendo

desbastadas para duas plantas por vaso. Após isso, os vasos foram irrigados sempre que necessário, a fim de manter a umidade do solo em torno de 80% da capacidade de campo. Para determinar a tolerância das espécies ao tebuthiuron, foram avaliadas, aos 15, 30, 45 e 60 dias após a semeadura (DAS), a fitotoxicidade do produto às plantas, a altura de plantas e, aos 60 DAS, além dos parâmetros analisados anteriormente, também foi determinada a biomassa seca da parte aérea e das raízes dessas plantas. Para a avaliação da fitotoxicidade, atribuíram-se notas de 0 a 100, de acordo com os sintomas de intoxicação observado na parte aérea das plantas, em que 0 (zero) representava ausência de sintomas e 100 (cem) a morte da planta. A altura das plantas foi medida do colo até o meristema apical, nas dicotiledôneas, e até a extremidade da última folha, nas demais espécies. Para determinar a biomassa seca da parte aérea, das raízes e do total da planta (parte aérea + raízes), o material colhido foi secado em estufa de circulação de ar forçada (70 ± 2 °C) por 72 horas.

Como os dados não atenderam às pressuposições de normalidade e homogeneidade para a realização da análise de variância, para interpretação dos resultados utilizou-se a análise descritiva dos dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram observados (Tabela 2) três grupos de espécies, segundo a tolerância destas ao tebuthiuron, nas quatro doses aplicadas. O primeiro grupo foi composto por espécies que foram altamente sensíveis ao tebuthiuron (aveia-preta, caruru-roxo, cravo-de-defunto, crotalária-espectabilis, crotalária-junceae, erva-andorinha, erva-de-santa-luzia, mostarda, nabiça, nabo forrageiro e xiquexique). Neste grupo, o tebuthiuron causou fitotoxicidade acima de 70% na menor dose utilizada ($0,5 \text{ kg ha}^{-1}$). O segundo grupo, composto por feijão-guandu, ervilhaca, girassol, lablabe e tremoço-branco, apresentou razoável tolerância ao tebuthiuron na dose de $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$; contudo, na dose de $1,0 \text{ kg ha}^{-1}$ essas cinco espécies exibiram também fitotoxicidade acima de 70%, sendo totalmente danificadas (mortas) pelo herbicida. Todavia, apesar da constatação da elevada fitotoxicidade a partir da dose de $1,0 \text{ kg ha}^{-1}$, o feijão-guandu, o lablabe e tremoço-branco são

de interesse quando cultivados em solo com baixo teor desse herbicida. Comportamento semelhante também foi observado para os parâmetros altura de plantas (Tabela 3), biomassa seca da parte aérea (Tabela 4), biomassa seca de raízes (Tabela 5) e biomassa seca total (Tabela 6), cujos resultados foram coerentes com os de fitotoxicidade.

As espécies que constituíram o terceiro grupo, apresentando maior tolerância ao tebuthiuron, com sintomas de fitotoxicidade menos acentuados e menor redução de altura de plantas e de biomassa seca em relação ao tratamento testemunha, foram feijão-de-porco, mucuna-anã, milho e mucuna-preta. Na dose de 0,5 kg ha⁻¹ o feijão-de-porco e a mucuna-preta mostraram-se tolerantes ao tebuthiuron, não apresentando sintomas de fitotoxicidade e redução da altura, mas apenas de biomassa seca da parte aérea em relação à testemunha. Nessa dose, a mucuna-preta apresentou inclusive maior biomassa seca de raízes e total que a testemunha. Resultados semelhantes para essa espécie foram obtidos por Silva e Bueno (2000 a, b).

Tabela 2 – Média (M) e desvio-padrão (s) da fitotoxicidade causada por doses crescentes de tebuthiuron nas espécies avaliadas aos 60 dias após a semeadura

Espécie	Tebuthiuron (kg ha ⁻¹)			
	0,0	0,5	1,0	2,0
	M ± s	M ± s	M ± s	M ± s
Aveia-preta	0 ± 0	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Caruru-roxo	0 ± 0	99 ± 1	100 ± 0	100 ± 0
Cravo-de-defunto	0 ± 0	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Crotalári-juncea	0 ± 0	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Crotalaria-spectabilis	0 ± 0	87 ± 23	100 ± 0	100 ± 0
Erva-andorinha	0 ± 0	99 ± 1	100 ± 0	100 ± 0
Erva-de-santa-luzia	0 ± 0	73 ± 30	91 ± 14	100 ± 0
Ervilhaca	0 ± 0	63 ± 35	100 ± 0	100 ± 0
Feijão-de-porco	0 ± 0	0,0 ± 0	70 ± 26	100 ± 0
Feijão-guandu	0 ± 0	20 ± 35	100 ± 0	100 ± 0
Girassol	0 ± 0	60 ± 40	100 ± 0	100 ± 0
Lablabe	0 ± 0	33 ± 58	100 ± 0	100 ± 0
Milheto	0 ± 0	43 ± 21	76 ± 24	100 ± 0
Mostarda	0 ± 0	87 ± 23	100 ± 0	100 ± 0
Mucuna-anã	0 ± 0	30 ± 10	52 ± 22	100 ± 0
Mucuna-preta	0 ± 0	0,0 ± 0	20 ± 17	100 ± 0
Nabiça	0 ± 0	83 ± 29	100 ± 0	100 ± 0
Nabo forrageiro	0 ± 0	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Tremoço-branco	0 ± 0	47 ± 11	90 ± 17	100 ± 0
Xique-xique	0 ± 0	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0

Tabela 3 – Média (M) e desvio-padrão (s) da inibição percentual da altura causada por doses crescentes de tebuthiuron nas espécies avaliadas aos 60 dias após a semeadura

Espécie	Tebuthiuron (kg ha ⁻¹)			
	0,0	0,5	1,0	2,0
	M ± s	M ± s	M ± s	M ± s
Aveia-preta	0 ± 22	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Caruru-roxo	0 ± 1	94 ± 2	100 ± 0	100 ± 0
Cravo-de-defunto	0 ± 11	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Crotalaria-juncea	0 ± 15	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Crotalaria-spectabilis	0 ± 0	79 ± 1	100 ± 0	100 ± 0
Erva-andorinha	0 ± 0	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Erva-de-santa-luzia	0 ± 0	81 ± 1	94 ± 0	100 ± 0
Ervilhaca	0 ± 0	81 ± 1	100 ± 0	100 ± 0
Feijão-de-porco	0 ± 4	0 ± 6	24 ± 17	100 ± 0
Feijão-guandu	0 ± 5	3 ± 4	100 ± 0	100 ± 0
Girassol	0 ± 2	56 ± 23	100 ± 0	100 ± 0
Lablabe	0 ± 14	47 ± 39	100 ± 0	100 ± 0
Milheto	0 ± 27	18 ± 19	42 ± 13	100 ± 0
Mostarda	0 ± 16	94 ± 3	100 ± 0	100 ± 0
Mucuna-anã	0 ± 2	11 ± 4	11 ± 4	100 ± 0
Mucuna-preta	0 ± 44	28 ± 30	23 ± 53	100 ± 0
Nabiça	0 ± 9	48 ± 43	100 ± 0	100 ± 0
Nabo forrageiro	0 ± 14	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Tremoço-branco	0 ± 4	13 ± 1	72 ± 9	100 ± 0
Xiquexique	0 ± 4	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0

Tabela 4 – Média (M) e desvio-padrão (s) da inibição pecentual da biomassa seca da parte aérea causada por doses crescentes de tebuthiuron nas espécies avaliadas aos 60 dias após a semeadura

Espécie	Tebuthiuron (kg ha ⁻¹)			
	0,0	0,5	1,0	2,0
	M ± s	M ± s	M ± s	M ± s
Aveia-preta	0 ± 4	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Caruru-roxo	0 ± 1	97 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Cravo-de-defunto	0 ± 2	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Crotalaria-juncea	0 ± 1	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Crotalaria-spectabilis	0 ± 0	79 ± 1	100 ± 0	100 ± 0
Erva-andorinha	0 ± 0	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Erva-de-santa-luzia	0 ± 0	81 ± 1	94 ± 0	100 ± 0
Ervilhaca	0 ± 0	81 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Feijão-de-porco	0 ± 2	5 ± 3	49 ± 4	100 ± 0
Feijão-guandu	0 ± 1	43 ± 1	100 ± 0	100 ± 0
Girassol	0 ± 1	68 ± 3	100 ± 0	100 ± 0
Lablabe	0 ± 1	5 ± 3	100 ± 0	100 ± 0
Milheto	0 ± 3	22 ± 2	8 ± 1	100 ± 0
Mostarda	0 ± 2	91 ± 1	100 ± 0	100 ± 0
Mucuna-anã	0 ± 1	36 ± 0	6 ± 1	100 ± 0
Mucuna-preta	0 ± 3	50 ± 2	13 ± 1	100 ± 0
Nabiça	0 ± 1	80 ± 3	100 ± 0	100 ± 0
Nabo forrageiro	0 ± 2	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
Tremoço-branco	0 ± 1	22 ± 0	39 ± 1	100 ± 0
Xiquexique	0 ± 1	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0

Tabela 5 – Média (M) e desvio-padrão (s) da inibição percentual da biomassa seca de raízes causada por doses crescentes de tebuthiuron nas espécies avaliadas aos 60 dias após a semeadura

Espécie	Tebuthiuron (kg ha ⁻¹)			
	0,0	0,5	1,0	2,0
	M $\pm$ s	M $\pm$ s	M $\pm$ s	M $\pm$ s
Aveia-preta	0 $\pm$ 6	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Caruru-roxo	0 $\pm$ 3	69 $\pm$ 2	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Cravo-de-defunto	0 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Crotalaria-juncea	0 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Crotalaria-spectabilis	0 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Erva-andorinha	0 $\pm$ 1	+ 8 $\pm$ 2	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Erva-de-santa-luzia	0 $\pm$ 1	76 $\pm$ 1	93 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Ervilhaca	0 $\pm$ 1	74 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Feijão-de-porco	0 $\pm$ 2	47 $\pm$ 0	69 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0
Feijão-guandu	0 $\pm$ 2	13 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Girassol	0 $\pm$ 3	95 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Lablabe	0 $\pm$ 0	30 $\pm$ 2	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Milheto	0 $\pm$ 3	29 $\pm$ 1	80 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0
Mostarda	0 $\pm$ 3	96 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Mucuna-anã	0 $\pm$ 2	50 $\pm$ 1	74 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0
Mucuna-preta	0 $\pm$ 2	+ 33 $\pm$ 1	29 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Nabiça	0 $\pm$ 3	79 $\pm$ 2	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Nabo forrageiro	0 $\pm$ 4	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Tremoço-branco	0 $\pm$ 1	45 $\pm$ 0	91 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Xiquexique	0 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0

* O sinal positivo à frente de algumas médias indica aumento da biomassa seca de raízes em relação à testemunha.

Tabela 6 – Média (M) e desvio-padrão (s) da inibição percentual da biomassa seca total causada por doses crescentes de tebuthiuron nas espécies avaliadas aos 60 dias após a semeadura

Espécie	Tebuthiuron (kg ha ⁻¹)			
	0,0	0,5	1,0	2,0
	M $\pm$ s	M $\pm$ s	M $\pm$ s	M $\pm$ s
Aveia-preta	0 $\pm$ 12	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Caruru-roxo	0 $\pm$ 4	83 $\pm$ 2	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Cravo-de-defunto	0 $\pm$ 3	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Crotalaria-juncea	0 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Crotalaria-spectabilis	0 $\pm$ 2	90 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Erva-andorinha	0 $\pm$ 1	35 $\pm$ 2	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Erva-de-santa-luzia	0 $\pm$ 1	78 $\pm$ 2	93 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0
Ervilhaca	0 $\pm$ 2	76 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Feijão-de-porco	0 $\pm$ 3	21 $\pm$ 4	57 $\pm$ 5	100 $\pm$ 0
Feijão-guandu	0 $\pm$ 3	18 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Girassol	0 $\pm$ 4	77 $\pm$ 3	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Lablabe	0 $\pm$ 1	14 $\pm$ 5	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Milheto	0 $\pm$ 5	26 $\pm$ 4	80 $\pm$ 2	100 $\pm$ 0
Mostarda	0 $\pm$ 3	93 $\pm$ 2	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Mucuna-anã	0 $\pm$ 2	41 $\pm$ 0	65 $\pm$ 2	100 $\pm$ 0
Mucuna-preta	0 $\pm$ 5	+ 44 $\pm$ 3	19 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0
Nabiça	0 $\pm$ 3	80 $\pm$ 5	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Nabo forrageiro	0 $\pm$ 6	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0
Tremoço-branco	0 $\pm$ 2	29 $\pm$ 0	54 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0
Xiquexique	0 $\pm$ 1	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0	100 $\pm$ 0

* O sinal positivo à frente de algumas médias indica aumento da biomassa seca total em relação à testemunha.

Comparando os efeitos do tebuthiuron sobre as espécies avaliadas quando aplicado em doses crescentes, observou-se, para a dose de $1,0 \text{ kg ha}^{-1}$, sensível aumento de fitotoxicidade desse herbicida sobre o feijão-de-porco, milho e tremoço-branco, sendo a redução de biomassa seca menos pronunciada no tremoço-branco. Todavia, a mucuna-anã e a mucuna-preta foram menos danificadas pelo tebuthiuron, apesar do menor desenvolvimento vegetativo apresentado.

Quando se aplicou o dobro da dose de tebuthiuron recomendada ($2,0 \text{ kg ha}^{-1}$), observou-se que nenhuma das espécies avaliadas sobreviveu ao herbicida, com exceção da mucuna-anã. Esta, apesar da elevada fitotoxicidade observada (90%), mostrou razoável tolerância ao herbicida. Como confirmado na literatura, o amplo espectro de ação do tebuthiuron (Dal Piccolo e Christoffoleti, 1985) dificulta a seleção de espécies que lhe sejam tolerantes e que, concomitantemente, apresentem interesse agrônomo - características estas desejáveis em plantas fitorremediadoras.

A evolução dos sintomas de fitotoxicidade causada pelo tebuthiuron, nas 20 espécies testadas, dos 15 aos 60 dias, está representada nas Figuras 2, 3, 4 e 5. Observa-se que metade da dose recomendada ($0,5 \text{ kg ha}^{-1}$) foi eficiente para eliminar oito das vinte espécies testadas, já aos 30 DAS, ou seja, a fitotoxicidade foi de 100%. Esse comportamento ficou mais evidente com o aumento da dose. Por outro lado, observou-se que o feijão-de-porco e a mucuna-preta cultivados em solo tratado com $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$ não exibiram sintomas de fitotoxicidade em nenhuma das avaliações.

Normalmente os sintomas de intoxicação do tebuthiuron somente aparecem quando as plântulas passam a depender de sua atividade fotossintética. Este herbicida age impedindo o transporte dos elétrons do FSII para o FSI, impedindo a formação de ATP e de NADP. Além disso, induz o tecido à produção de peróxidos, que aceleram o aparecimento da fitotoxicidade, com subsequente morte do tecido foliar (Hess e Weller, 2000).

A maior tolerância ao tebuthiuron – observada para as espécies feijão-de-porco, mucuna-anã, mucuna-preta e tremoço-branco – possivelmente, está ligada à reserva cotiledonar disponível na semente, responsável pelo desenvolvimento

inicial da planta. Normalmente, sementes com maior reserva cotiledonar geram plantas que toleram melhor inibidores da fotossíntese, dentro de uma mesma espécie (Silva, 1979). A reserva disponível, por sua vez, está ligada ao tamanho da semente, entre outros fatores, sendo essa, talvez, a possível explicação para o comportamento do feijão-de-porco, da mucuna-anã e da mucuna-preta, que possuem sementes de tamanho maior; entretanto, não se aplica ao tremoço-branco, que também teve comportamento semelhante ao daquelas três espécies.

Quando se avaliaram os efeitos do tebuthiuron sobre a altura das espécies analisadas, observou-se que ao longo das quatro avaliações esta característica teve comportamento similar ao observado em relação à fitotoxicidade, porém em ordem contrária, havendo redução progressiva da altura das plantas com o aumento das doses de tebuthiuron (Figura 6, 7, 8 e 9). Todavia, na dose de $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$, feijão-de-porco, feijão-guandu, milheto, mucuna-anã, mucuna-preta e tremoço-branco apresentaram menores inibições percentuais na altura em relação à testemunha. Quando foi aplicada a dose de $1,0 \text{ kg ha}^{-1}$, apenas a mucuna-preta não mostrou redução acentuada na altura das plantas. Quando essas espécies foram cultivadas em solo tratado com $2,0 \text{ kg ha}^{-1}$, aos 15 DAS, praticamente todas foram eliminadas (mortas).

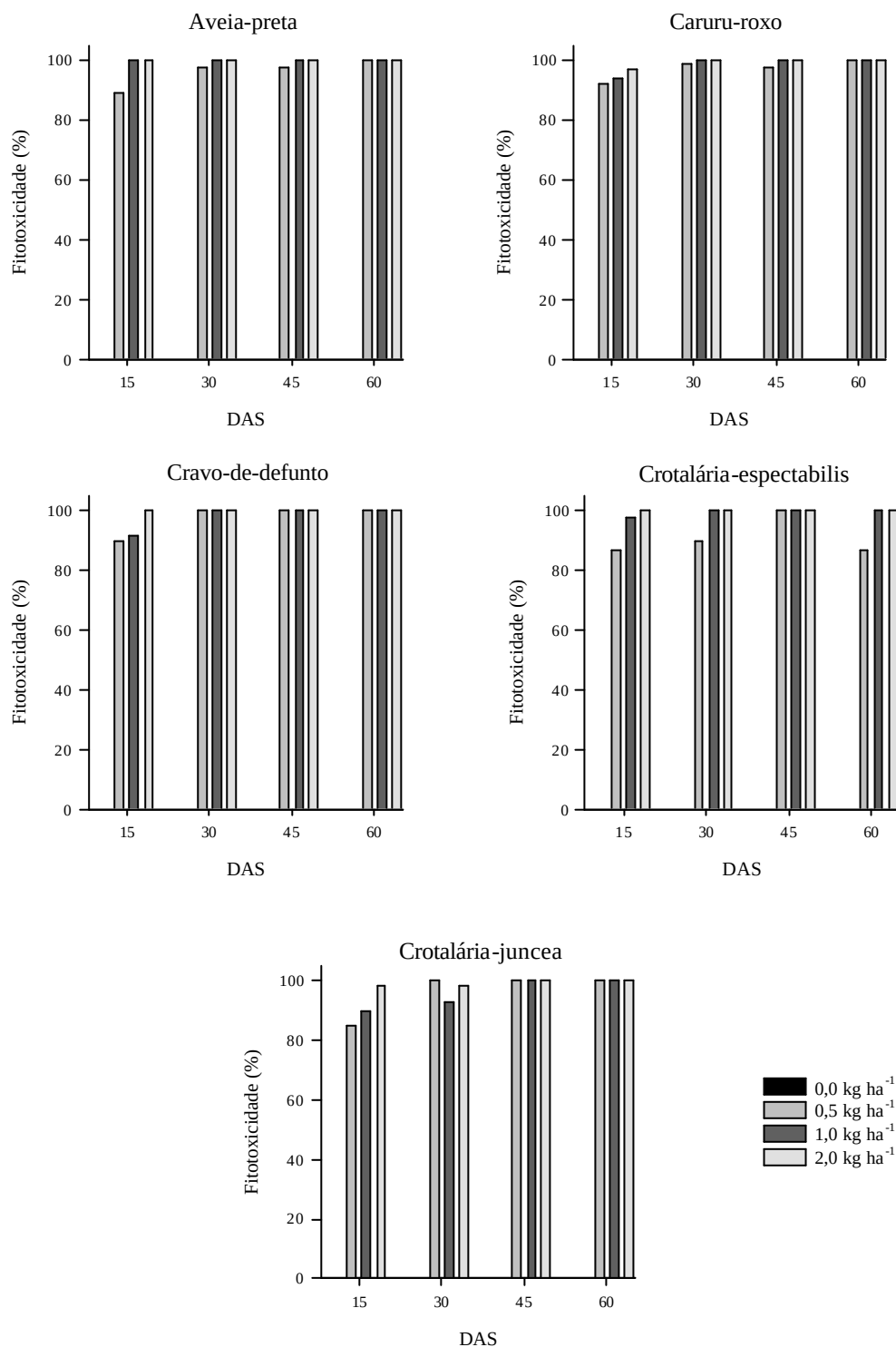


Figura 2 – Fitotoxicidade observada em plantas de aveia-preta, cravo-de-defunto, caruru-roxo, crotalaria-espectabilis e crotalaria-juncea aos 15, 30, 45 e 60 dias após a semeadura (DAS), cultivadas em solos tratados com diferentes doses de tebuthiuron.

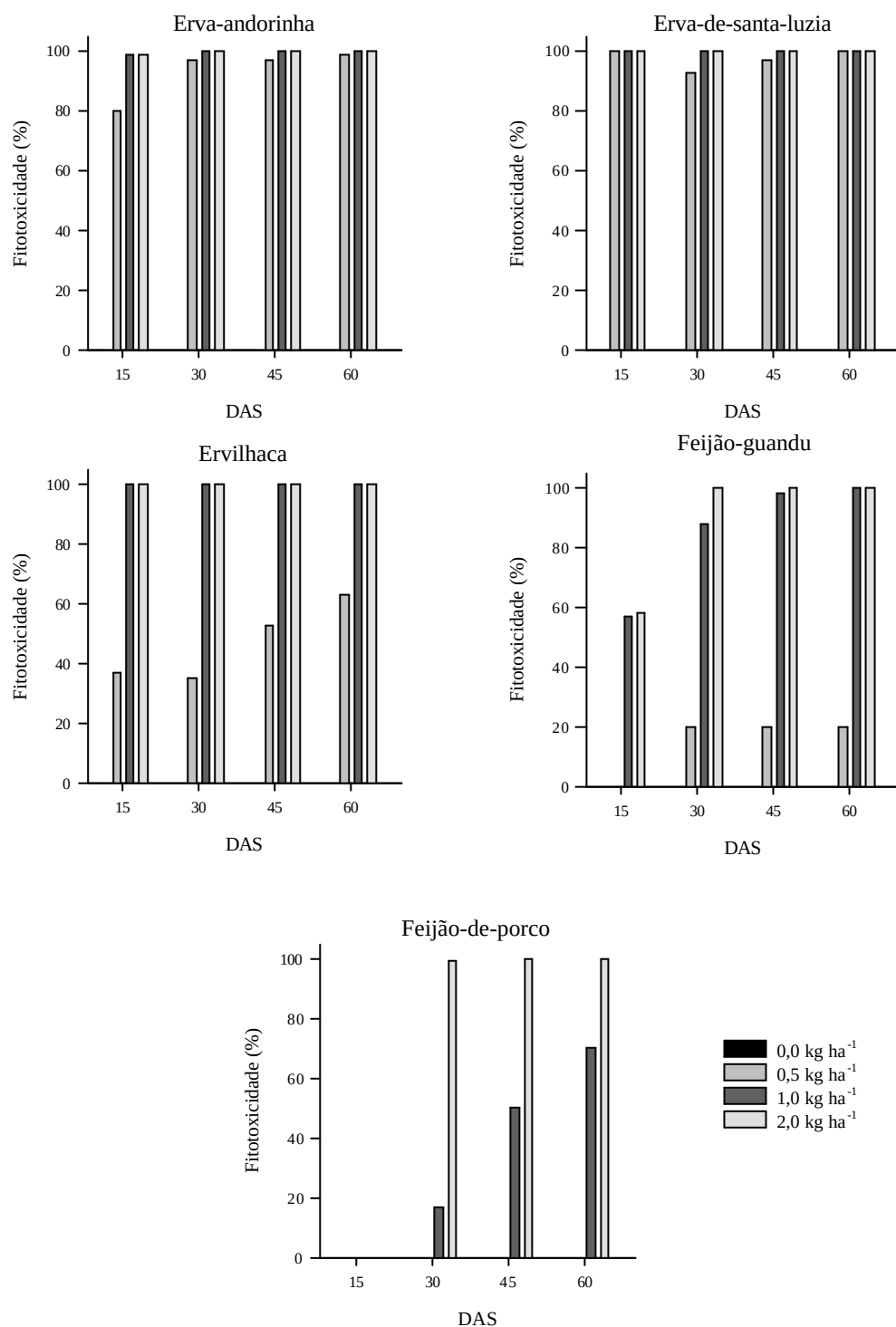


Figura 3 – Fitotoxidade observada em plantas de erva-andorinha, erva-de-santa-luzia, ervilhaca, feijão-guandu e feijão-de-porco aos 15, 30, 45 e 60 dias após a semeadura (DAS), cultivadas em solos tratados com diferentes doses de tebuthiuron.

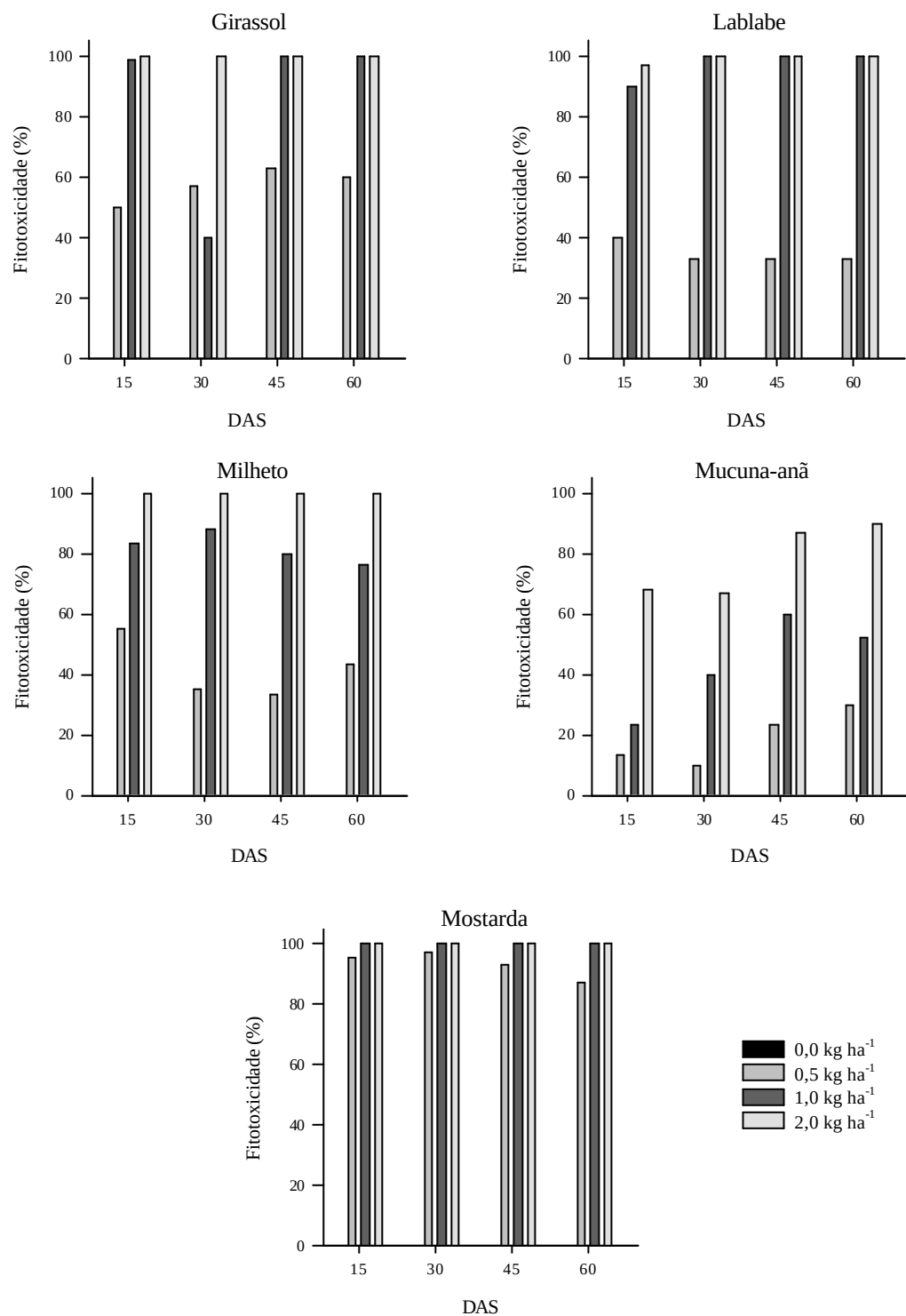


Figura 4– Fitotoxidade observada em plantas de girassol, lablabe, milheto, mucuna-anã e mostarda aos 15, 30, 45 e 60 dias após a semeadura (DAS), cultivadas em solos tratados com diferentes doses de tebutiuron).

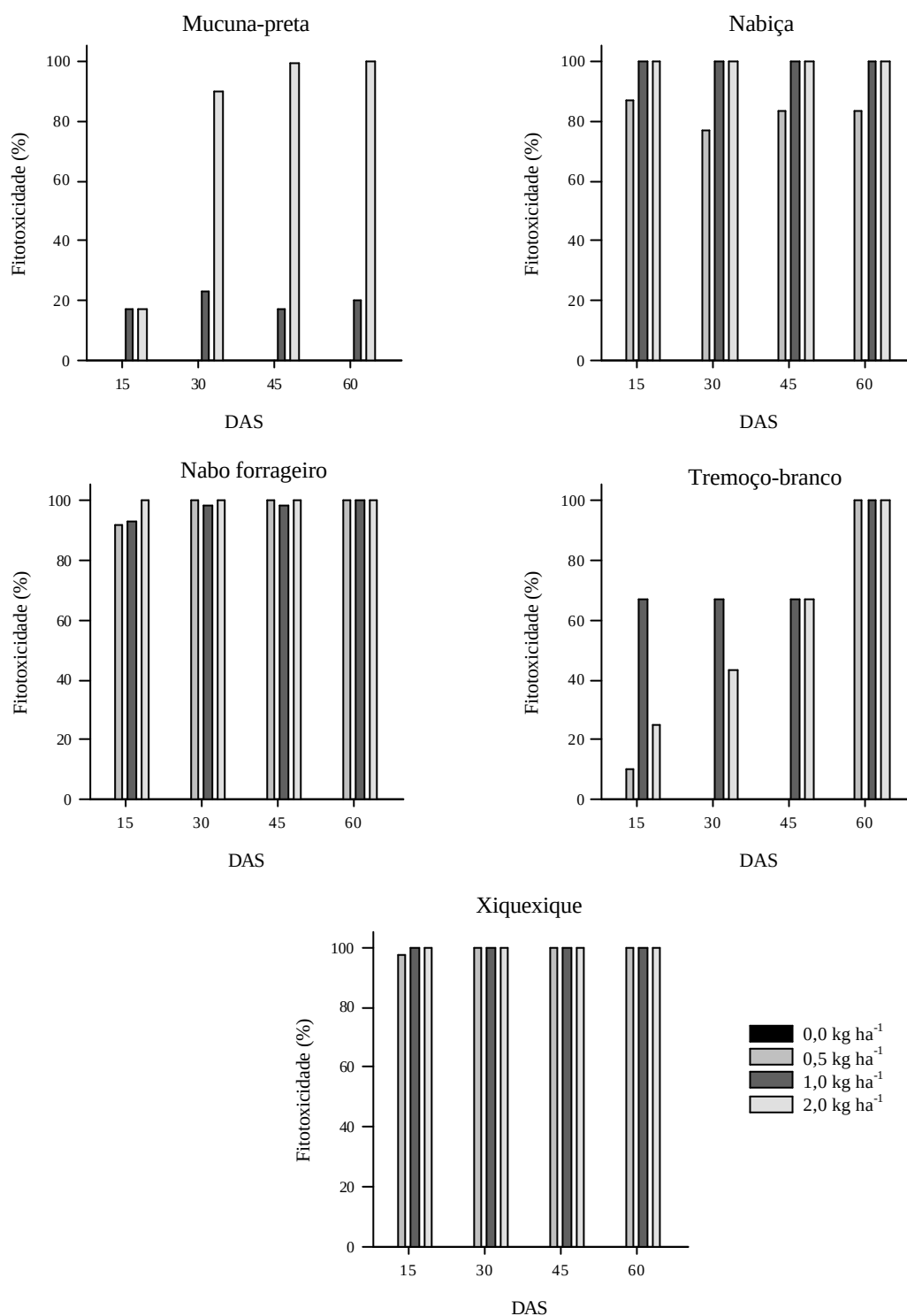


Figura 5 – Fitotoxicidade observada em plantas de mucuna-preta, nabiça, nabo forrageiro, tremoço-branco e xiquexique aos 15, 30, 45 e 60 dias após a semeadura (DAS), cultivadas em solos tratados com diferentes doses de tebuthiuron.

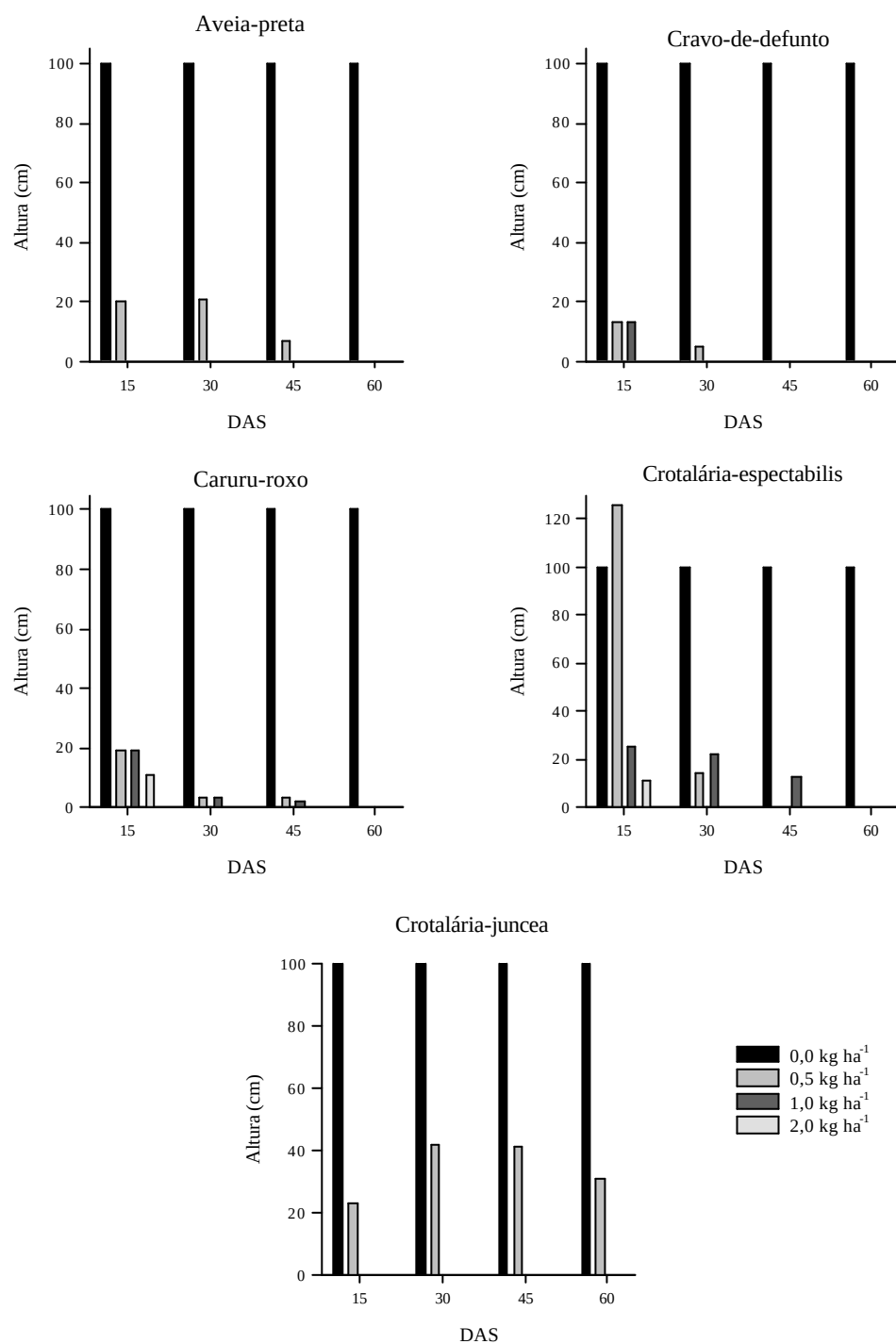


Figura 6 – Altura de plantas de aveia-preta, cravo-de-defunto, caruru-roxo, crotalaria-espectabilis e crotalaria-juncea, cultivadas sob as doses de 0,5; 1,0 e 2,0 kg ha⁻¹ de tebuthiuron, expressa em percentagem, em relação à testemunha sem herbicida (dose zero). Avaliações realizadas aos 15, 30, 45 e 60 dias após a semeadura (DAS).

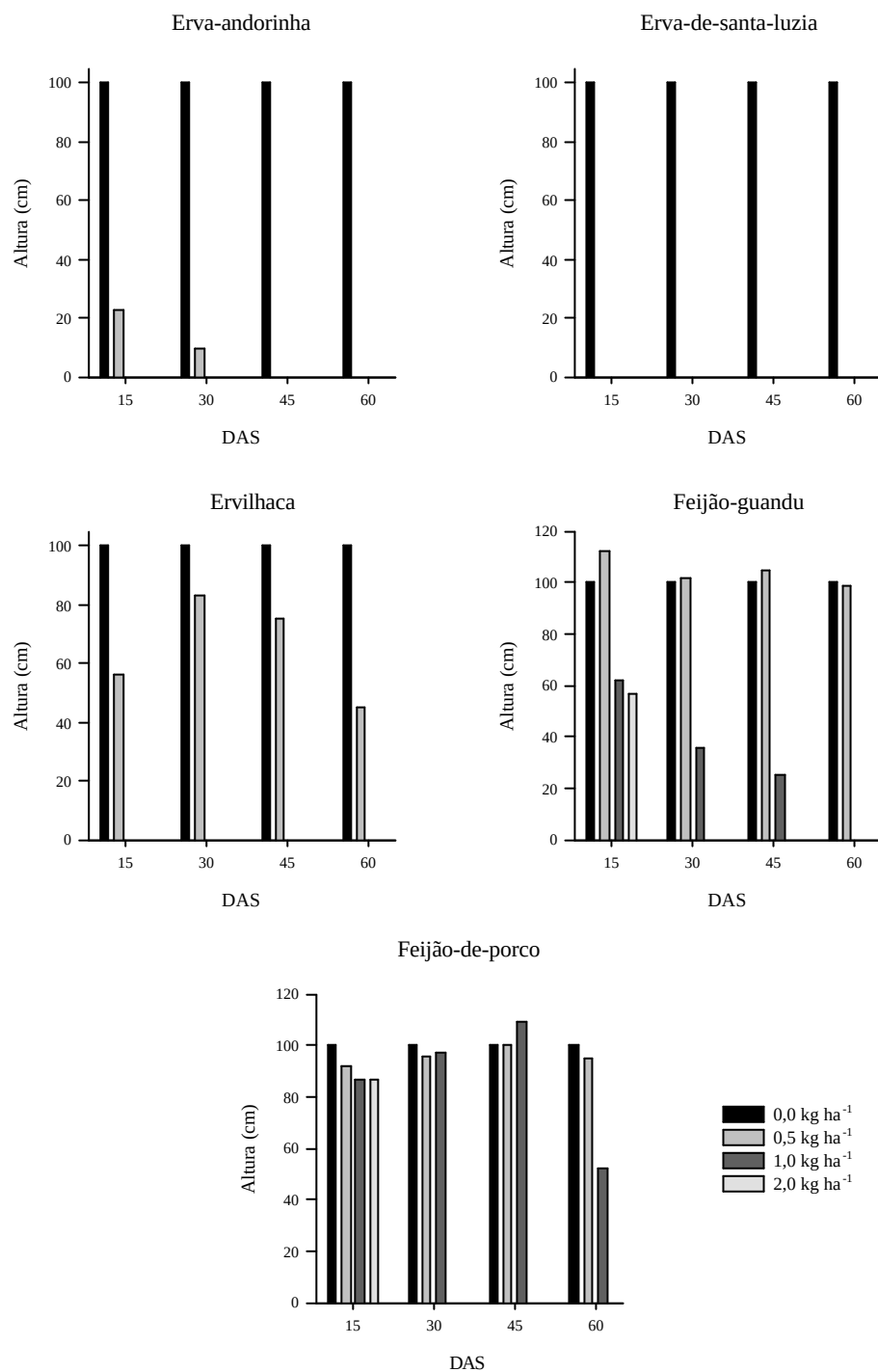


Figura 7 – Altura de plantas de erva-andorinha, erva-de-santa-luzia, ervilhaca, feijão-guandu e feijão-de-porco, cultivadas sob as doses de 0,5; 1,0 e 2,0 kg ha⁻¹ de tebuthiuron, expressa em porcentagem, em relação à testemunha sem herbicida (dose zero). Avaliações realizadas aos 15, 30, 45 e 60 dias após a semeadura (DAS).

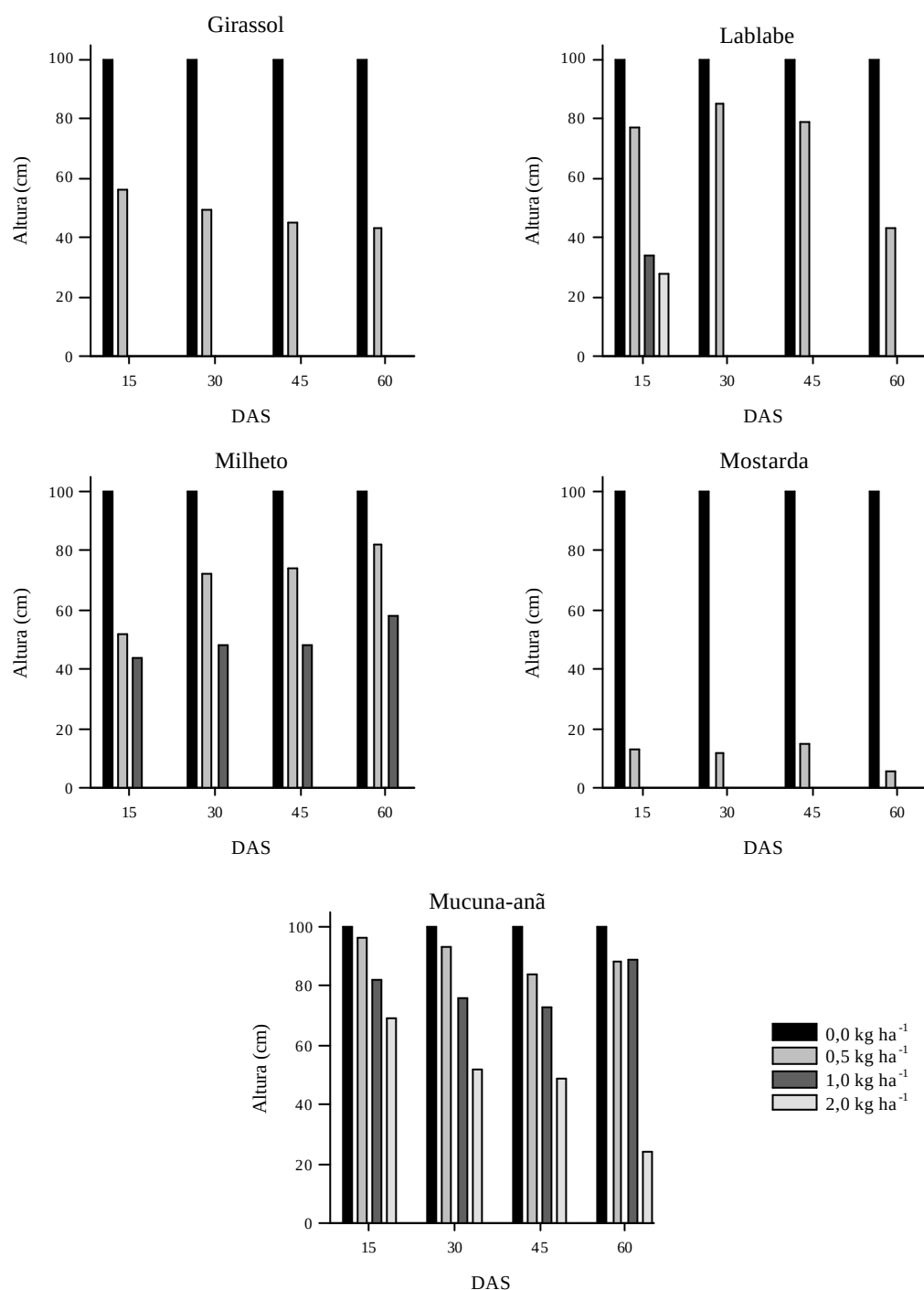


Figura 8 – Altura de plantas de girassol, lablabe, milheto, mostarda e mucuna-anã, cultivadas sob as doses de 0,5; 1,0 e 2,0 kg ha⁻¹ de tebuthiuron, expressa em percentagem, em relação à testemunha sem herbicida (dose zero). Avaliações realizadas aos 15, 30, 45 e 60 dias após a semeadura (DAS).

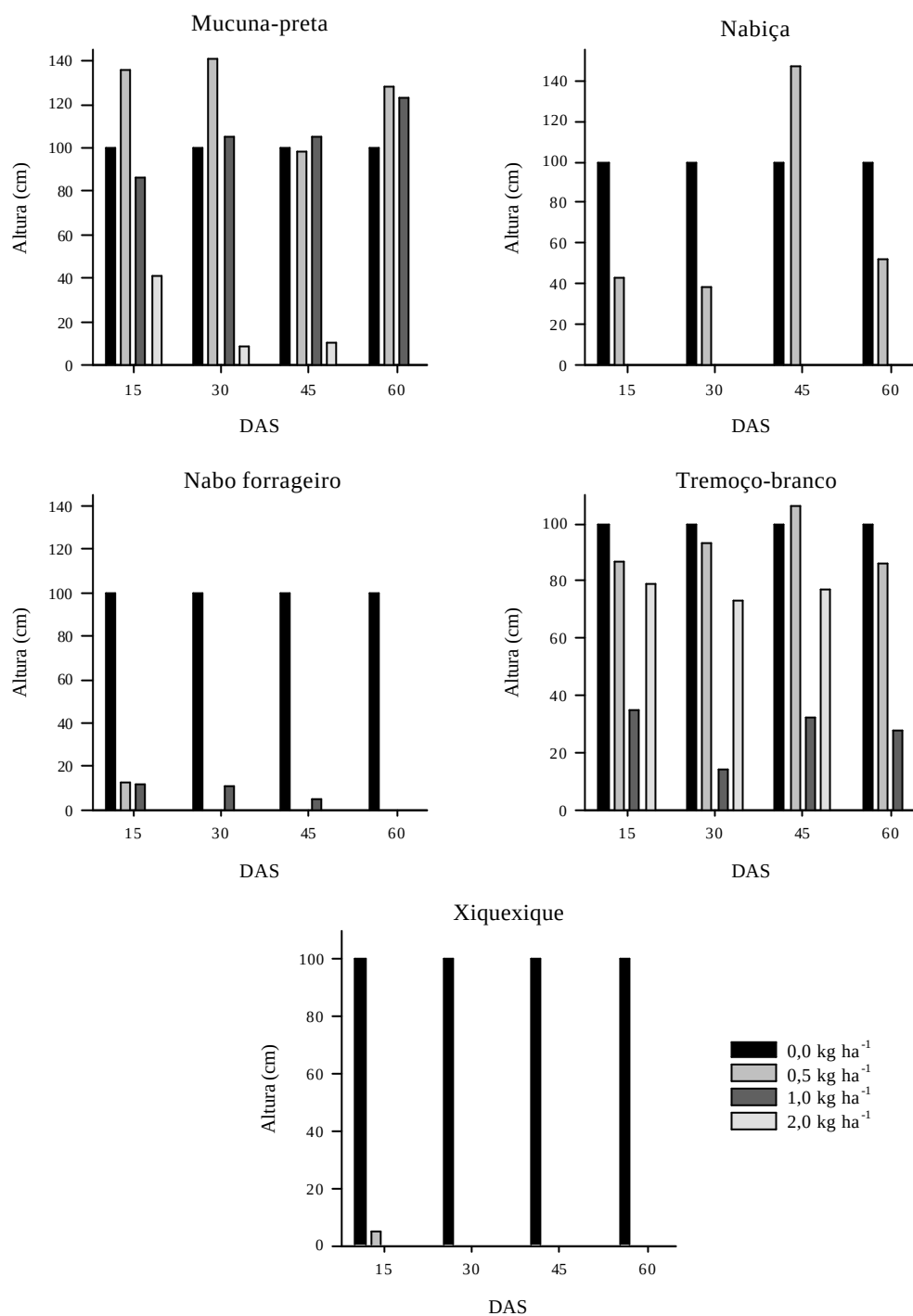


Figura 9 – Altura de plantas de mucuna-preta, nabiça, nabo forrageiro, tremoço-branco e xiquexique, cultivadas sob as doses de 0,5; 1,0 e 2,0 kg ha⁻¹ de tebuthiuron, expressa em percentagem, em relação à testemunha sem herbicida (dose zero). Avaliações realizadas aos 15, 30, 45 e 60 dias após a semeadura (DAS).

CONCLUSÕES

Nas condições ambientais em que o experimento foi conduzido, concluiu-se que:

- 1) As espécies que apresentam maior tolerância ao tebuthiuron foram mucuna-preta, mucuna-anã, feijão-de-porco, e milheto, indicando potencial para utilização em posteriores estudos de fitorremediação desse herbicida no solo.
- 2) O feijão-guandu, o lablabe e o tremoço-branco exibiram tolerância intermediária ao tebuthiuron, podendo ser de interesse para estudos de fitorremediação desse herbicida no solo quando o nível de resíduo for baixo.
- 3) As demais espécies não toleraram o tebuthiuron, não sendo, portanto, indicadas para estudos de fitorremediação de solos contaminados por esse herbicida.

LITERATURA CITADA

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.

ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. Screening rhizosphere soil samples for the ability to mineralize elevated concentrations of atrazine and metolachlor. **J. Environ. Sci. Health**, v. 30, p. 473-84, 1995.

APPROBATO FILHO, A.; GERARDI, L. E.; ANDRADE, T. L. C.; DAMACENO, A. C.; LEAVITT, J. R. C.; HIDALGO, E. Determinação da segurança de terbacil em culturas de rotação com cana-de-açúcar, após 3 a 4 aplicações anuais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE HERBICIDAS E PLANTAS DANINHAS, 17., 1988, Foz do Iguaçu, PR. **Resumos...** Foz do Iguaçu, PR: SBHED, 1998. p. 71-72.

BLANCO, J. G.; OLIVEIRA, D. A. Persistência de herbicidas em Latossolo Vermelho-Amarelo em cultura de cana-de-açúcar. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 22, p. 681-687, 1987.

BOVEY, R. W.; MEYER, R. E.; HEIN JR.; H. Soil persistence of tebuthiuron in the Claypan Resource Area os Texas. **Weed Sci.**, v. 30, p. 140-144, 1982.

CERDEIRA, A. L.; GOMES, M. A.; QUEIROZ, R. C.; BONATO, P. S.; FERRACINI, V. L.; LANCHOTE, V. L. Herbicide and nitrate residues in surface and groundwater from sugarcane area in Brazil. **Bolletino Chimico Farmaceutico**, v. 138, n. 2, p. 131, 1999.

CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Adv. Agron.**, v. 56, p. 55-114, 1996.

DAL PICCOLO, C. R.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Efeito residual de herbicidas utilizados na cultura da cana-de-açúcar sobre a *Crotalaria juncea* L. em rotação. **Saccharum**, v. 8, p. 34-38, 1985.

DAL PICCOLO, C. R.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; COLETI, J. T. Estudo da persistência de herbicidas utilizados na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) sobre a cultura do feijão em rotação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE HERBICIDAS E PLANTAS DANINHAS, 16., Campo Grande, MS, 1986. **Resumos...** Campo Grande, MS: SBHED, 1986. p. 30-31.

DORNELAS DE SOUZA, M.; BOEIRA, R. C.; GOMES, M. A. F.; FERRACINI, V. L.; MAIA, A. H. N. Adsorção e lixiviação de tebuthiuron em três tipos de solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 25, p. 1053-1061, 2001.

EMMERICH, W. E.; HELMER, J. D.; RENARD, K. G.; LANE, L. J. Fate and effectiveness of tebuthiuron applied to a rangeland watershed. **J. Environ. Qual.**, v. 13, p. 382-386, 1984.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

HESS, F. D.; WELLER, S. C. Mode of action in photosystem II. Photosynthesis inhibitors. In: **Herbicide action course**. Purdue University: Indiana, 2000, 942 p.

HOAGLAND, R. E.; ZABLOTOWICZ, R. M.; LOCKE, M. A. An integrated phytoremediation strategy for chloracetamide herbicides in soil. In: **Phytoremediation of soil and water contaminants**, 1997. Washington, DC: **ACS Symposium Series...** Washington, DC: American Chemical Society, 1997. p. 92-105.

KRUGER, E. L.; ANHALT, J. C.; SORENSON, D.; NELSON, B.; CHOUHY, A. L.; ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. Atrazine degradation in pesticide-contaminated soils: phytoremediation potential. In: **Phytoremediation of soil and water contaminants**, 1997. Washington, DC: **ACS Symposium Series...** Washington, DC: American Chemical Society, 1997. p. 54-64.

LISTE, H. H.; ALEXANDER, M. Rapid screening of plants promoting phenanthrene degradation. **Published in J. Environ. Qual.**, v. 28, p. 1376-1377, 1999.

LORENZI, H. **Manual de identificação e de controle de plantas daninhas:** plantio direto e convencional. Nova Odessa, SP: Plantarum, 2000. 339 p.

MACEK, T.; MACKOVÁ, M.; KÁŠ, J. Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation. **Biotechnol. Adv.**, v. 18, p. 23-34, 2000.

MEYER, R. E.; BOVEY, R. W. Tebuthiuron formulation and placement effects on response of woody plants and soil residue. **Weed Sci.**, v. 36, p. 373-378, 1988.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas.** 4 ed. Londrina: Edição dos Autores, 1998. 648 p.

ROGERS, H. B.; BEYROUTY, C. A.; NICHOLS, T. D.; WOLF, D. C.; REYNOLDS, C. M. Selection of cold-tolerant plants for growth in soils contaminated with organics. **J. Soil Contamin.**, v. 5, p. 171-186, 1996.

SCRAMIN, S.; SKORUPA, L. A.; MELO, I. S. Utilização de plantas na remediação de solos contaminados por herbicidas – levantamento da flora existente em áreas de cultivo de cana-de-açúcar. In: MELO, I. S.; SILVA, C. M. M. S.; SCRAMIN, S.; SPESSOTO, A. **Biodegradação.** Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, 2001. p. 369-71.

SILVA, J. F. **Influência do tamanho da semente de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) sobre sua tolerância ao metribuzin e estudos da lixiviação e inativação deste por dois tipos de solos.** 1979. 70 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) –Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1979.

WILTSE, C. C.; ROONEY, W. L.; CHEN, Z.; SCHWAB, A. P.; BANKS, M. K. Greenhouse evaluation of agronomic and crude oil-phytoremediation potential among alfalfa genotypes. **Published in J. Environ. Qual.**, v. 27, p. 169-173, 1998.

FITORREMEDIAÇÃO DE TEBUTHIURON EM SOLO POR ESPÉCIES CULTIVADAS PARA ADUBAÇÃO VERDE

RESUMO

O emprego da fitorremediação na despoluição de solos poluídos com compostos orgânicos, inclusive herbicidas, vem sendo pesquisado ultimamente. Como o tebuthiuron pode causar sério impacto ambiental, por ser muito utilizado, apresentar longo efeito residual no solo e possibilidade de contaminação de lençol de água subterrâneo, desenvolveu-se este trabalho objetivando avaliar a capacidade de sete espécies vegetais na despoluição de solos tratados por esse herbicida. As espécies avaliadas nesse experimento foram: *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lablab*, *Pennisetum typhoides*, *Estizolobium deeringianum*, *Estizolobium aterrimum* e *Lupinus albus*. Estas foram semeadas e cultivadas por 60 dias, em vasos tratados com diferentes doses do tebuthiuron (0,0; 0,5; 1,0; e 1,5 kg ha⁻¹). Foi mantida uma testemunha sem planta, submetida às mesmas doses. Aos 60 dias após a semeadura colheu-se a parte aérea de todas as plantas e semearam-se aveia-preta e soja no mesmo vaso, para realização do bioensaio. Depois de 60 dias da semeadura das espécies bioindicadoras (aveia-preta e soja), estas foram colhidas, sendo avaliadas nesta ocasião as seguintes características: altura de plantas, sintomas de fitotoxicidade e biomassa seca da parte aérea das plantas. Nesta época foi avaliado também, na cultura da soja, o Índice de Área Foliar (IAF). Até a dose de 0,5 kg ha⁻¹ de tebuthiuron, a espécie que melhor fitorremediou esse herbicida no solo foi o tremoço-branco. Quando o solo foi tratado com 1,0 kg ha⁻¹ de tebuthiuron, o *C. ensiformis*, seguido de *L. albus* e *S. aterrimum*, foram os tratamentos que melhor fitorremediaram o tebuthiuron. Essa conclusão teve como base a maior altura de plantas, biomassa seca da parte aérea e menor fitotoxicidade de aveia-preta e, ainda, o maior IAF de soja observados, quando a aveia-preta e a soja foram cultivadas em sucessão a essas plantas remediadoras citadas. Quando o solo apresentava altas

concentrações de resíduo de tebuthiuron, não foi possível fazer a fitorremediação, pois as plantas testadas foram eliminadas.

Palavras-chave: despoluição do solo, fitodegradação, bioensaio, aveia-preta, soja.

*TEBUTHIURON PHYTOREMEDIATION IN SOIL BY CULTIVATED SPECIES
TO GREEN MANURE*

ABSTRACT

The use of phytoremediation in the depollution of soil polluted by organic compound, including herbicides, is being researched nowadays. As the tebuthiuron can cause serious environmental impact, it can be very utilized, present long soil residual effect and possibility of sheet underground water contamination, this work was developed aiming to evaluate the capacity of seven vegetal species in soil depollution treated by this herbicide. The experiment evaluated the species: *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lablab*, *Pennisetum typhoides*, *Estizolobium deeringianum*, *Estizolobium aeterrimum* and *Lupinus albus*. These were sowed and cultivated for 60 days, in treated vases with tebuthiuron at 0,0; 0,5; 1,0; e 1,5 kg ha⁻¹. There was a control treatment without plant, submitted to the same doses. After 60 days after planting it was harvested aerial part of all the plants and it was sowed *Avena strigosa* and soybean at the same vase, to bioassay accomplishment. After 60 days of bioindicators species planting (*A. strigosa* and soybean), they were harvested, being evaluated the follow characteristics: plants height, phytotoxicity symptoms and dry biomass of plant aerial part. It was also evaluated, at soybean crop, Leaf Area Index (LAI). In tebuthiuron at 0,5 kg ha⁻¹, the *L. albus* was the specie that better phytoremediated this herbicide in the soil. When the soil was treated with tebuthiuron at 1,0 kg ha⁻¹, the *C. ensiformis*, followed by the *L. albus* and *S. aeterrimum*, were the treatment that better phytoremediation the tebuthiuron.

The base to this conclusion was the highest plants, dry biomass of plant aerial part and minor *A. strigosa* phytotoxicity, still, highest soybean LAI of observed, when the *A. strigosa* and the soybean were cultivated in succession to those mentioned remediators plants. When the soil presented high concentrations of tebuthiuron residue, fitoremediation was not possible, because the tested plants were eliminated.

Key words: soil depollution, phytodegradation, bioassay, *Avena strigosa*, soybean.

INTRODUÇÃO

Atualmente cresce o interesse pela fitorremediação. Esta técnica objetiva a descontaminação de solo e água utilizando-se, como agente de descontaminação, plantas (Newman et al., 1998), podendo ser resultante: da assimilação direta dos contaminantes e subsequente acumulação de metabólitos não-tóxicos nos tecidos vegetais, como componentes estruturais, e do estímulo da atividade microbiana provocada pela liberação de exsudatos que favorecem o aumento da mineralização do contaminante na região da rizosfera (Scramin et al., 2001).

A fitorremediação pode ser usada em áreas contaminadas com substâncias orgânicas e/ou inorgânicas. Resultados promissores de fitorremediação já foram obtidos para metais pesados, metalóides, hidrocarbonetos de petróleo, agrotóxicos, explosivos, solventes clorados e subprodutos tóxicos da indústria (Cunningham et al., 1996).

No entanto, solos contaminados com herbicidas apresentam certas limitações à seleção de espécies de plantas fitorremediadoras, quando comparados com outros contaminantes orgânicos ou inorgânicos, por serem, muitas vezes, tóxicos às plantas, principalmente onde ocorrem compostos com largo espectro de ação, como o tebuthiuron (Meyer e Bovey, 1988; Johnsen e Morton, 1991). Todavia, alguns trabalhos relatam a contribuição de plantas, estimulando o efeito rizosférico e acelerando a mineralização de alguns herbicidas, principalmente

relacionados aos herbicidas atrazine e metolachlor (Anderson et al., 1994; Anderson e Coats, 1995; Perkovich et al., 1996; Burken e Sschnoor, 1996) e simazine (Wilson et al., 2000).

No trabalho desenvolvido por Arthur et al. (2000), por exemplo, constatou-se que, nos solos rizosféricos de *Kochia scoparia*, a meia-vida da atrazine foi de 50 dias e, nos solos não-vegetados, de 193 dias. Esses resultados demonstram claramente o potencial da utilização de plantas terrestres e aquáticas como fitorremediadoras de agrotóxicos.

No Brasil, recentes pesquisas têm difundido a utilização de plantas na fitorremediação de herbicidas (Scramin et al., 2001; Pires et al., 2003). Desse modo, a aplicação de fitorremediação na despoluição de solos contaminados com o herbicida tebuthiuron, que desperta interesse por apresentar longo efeito residual no solo (Bovey et al., 1982) e elevada solubilidade (Steinert e Stritzke, 1977), pode representar uma alternativa vantajosa em situações em que os níveis desse composto sejam elevados no solo e as condições deste favoreçam sua lixiviação.

O tebuthiuron é aplicado no solo, onde é absorvido pelas raízes e acumulado na parte aérea (Steinert e Stritzke, 1977). Esses autores constataram que a absorção diferenciada apresentada pelas espécies vegetais contribui para a maior ou menor suscetibilidade ao tebuthiuron. Como grande parte do tebuthiuron absorvido é metabolizada a compostos menos tóxicos na planta (McNeil et al., 1984), aquelas que são tolerantes acumulam mais metabólitos e menos moléculas originais de tebuthiuron e não o acumulam em quantidades fitotóxicas, ao contrário do que ocorre com espécies sensíveis a esse herbicida (Johnsen e Morton, 1991).

Essas informações são importantes para a aplicação da fitodegradação. Por esse processo o contaminante é absorvido pela planta e metabolizado na parte aérea (Ferro et al., 1994). Esta hipótese foi comprovada por Burken e Schnoor (1996), os quais observaram que cerca de 91% da atrazine lábil aplicada foi absorvida e assimilada por uma espécie conhecida como *Poplar*, em nove dias, quando cultivada em areia, e 30% em 80 dias, quando em solo franco-siltoso.

As pesquisas envolvendo a fitorremediação de diferentes contaminantes empregam técnicas experimentais que podem ser executadas em laboratório, casa de vegetação e campo. Nos estudos de casa de vegetação, o emprego de plantas indicadoras, sensíveis ao composto avaliado e cultivadas em sucessão, no próprio vaso ou em outros recipientes, fornece informações importantes a respeito do contaminante, com o objetivo de nortear pesquisas mais refinadas. Normalmente, estas são corroboradas nas determinações cromatográficas ou cintilação líquida. Por outro lado, do ponto de vista fitotécnico, conseguem elucidar diversos questionamentos que são posteriormente levados a campo. Ensaio biológicos foram empregados no estudo da persistência e da degradação do tebuthiuron (Chang e Stritzke, 1977; Bovey et al., 1982; Whisenant e Clary, 1987) e também no estudo da fitorremediação de óleo diesel (Tesar et al., 2002).

Este trabalho teve como objetivo avaliar a fitorremediação de tebuthiuron promovida por sete espécies de plantas cultivadas para adubação verde, utilizando aveia-preta e soja como plantas indicadoras.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal de Viçosa. A unidade experimental foi vaso de polietileno com capacidade para 5 dm³ de substrato. Utilizou-se material de solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo, coletado sob vegetação de mata secundária, na profundidade de 0-20 cm, peneirado em malha de 0,004 m e caracterizado físico-quimicamente (Tabela 1). Essa caracterização serviu de base para a correção e as adubações realizadas visando bom desenvolvimento das espécies avaliadas como fitorremediadoras e das plantas bioindicadoras.

O experimento foi montado seguindo um esquema fatorial 8 x 4 (7 espécies + 1 testemunha = 8 e 4 doses) no delineamento de blocos ao acaso, com três repetições. Foram utilizadas no ensaio sete espécies de plantas previamente selecionadas quanto à tolerância ao herbicida tebuthiuron, sendo elas: feijão-guandu (*Cajanus cajan*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), lablabe

(*Dolichos lablab*), milheto (*Pennisetum typhoides*), mucuna-anã (*Estizolobium deeringianum*), mucuna-preta (*Estizolobium aterrimum*) e tremoço-branco (*Lupinus albus*), sendo mantida uma testemunha sem planta, submetidas às mesmas condições. O tebuthiuron foi aplicado em pré-emergência, nas doses 0,0; 0,5; 1,0 e 1,5 kg ha⁻¹, sendo utilizada a marca Combine 500 SC. Para a aplicação do herbicida utilizou-se pulverizador de precisão, pressurizado com gás carbônico (CO₂) e bicos 110.03 aplicando-se o equivalente a 260 L ha⁻¹ de calda.

Tabela 1 – Composição físico-química do material de solo utilizado no experimento^{1/}

Análise Granulométrica (dag kg ⁻¹)										
Argila		Silte		Areia Fina		Areia Grossa		Classificação Textural		
47		8		14		31		Argilo-arenosa		
Análise Química										
pH H ₂ O	P	K ⁺	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H + Al	CTC total	V	M	MO
	(mg dm ³)		(cmol _c dm ³)					(%)		(dag kg ⁻¹)
5,6	10,6	60	0,0	2,6	0,6	2,64	5,99	56	0	2,39

^{1/} Análises realizadas nos Laboratórios de Análises Físicas e Químicas de Solo do Departamento de Solos da UFV, segundo a metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA (1997).

A semeadura das espécies fitorremediadoras foi realizada um dia após a aplicação do tebuthiuron. Após a semeadura das espécies, os vasos foram irrigados sempre que necessário, a fim de manter a umidade do solo em torno de 80% da capacidade de campo, por 60 dias. Após esse período, a parte aérea de todas as plantas foi colhida, o solo foi adubado e imediatamente foram semeadas aveia-preta e soja, como plantas indicadoras para realização do bioensaio no próprio vaso. Estas foram cultivadas por mais 60 dias. A aveia-preta foi escolhida em razão da elevada suscetibilidade ao tebuthiuron que apresentou em ensaio anterior, e a soja, por ser uma cultura sensível e cultivada em rotação com a cana-de-açúcar. Ao término desse período foram avaliadas altura de plantas, biomassa seca da parte aérea e sintomas de fitotoxicidade das plantas de aveia-preta e de soja, e também, nesta última, o índice de área foliar (IAF).

Os dados foram submetidos à análise de variância e regressão. As médias do fator qualitativo (espécies remediadoras) foram comparadas utilizando-se o teste de Duncan, a 5% de probabilidade. Para o fator quantitativo (doses) os modelos foram escolhidos com base no coeficiente de determinação e no fenômeno biológico. Independentemente de a interação ser ou não significativa, optou-se pelo seu desdobramento. Para algumas características avaliadas e espécies, por atenderem às pressuposições de homogeneidade e normalidade na análise de variância, realizou-se a análise descritiva dos dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Constata-se nas Figura 1, 2, 3, 4 e 5, e na Tabela 2 o efeito significativo das doses de tebuthiuron sobre altura, biomassa seca da parte aérea e também sobre a porcentagem de fitotoxicidade desse herbicida sobre a planta indicadora (aveia-preta), quando em sucessão às diferentes espécies fitorremediadoras e à testemunha sem planta. A altura das plantas e a biomassa seca da parte aérea da aveia-preta, em sucessão às diferentes espécies fitorremediadoras, diminuíram com o aumento das doses de tebuthiuron; a intensidade da queda foi semelhante para as espécies testadas. Efeitos semelhantes foram observados para fitotoxicidade do produto sobre as plantas indicadoras.

O comportamento das características da aveia-preta avaliadas em sucessão às espécies fitorremediadoras não seguiu um padrão comum. Todavia, a altura de plantas e a biomassa seca da parte aérea apresentaram comportamento similar. Quando cultivada em sucessão a praticamente todos os adubos verdes testados, a aveia-preta apresentou brusca redução da altura e da biomassa seca a partir da dose de $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$, sendo completamente destruída na dose $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$, em razão da elevada toxicidade apresentada pelo tebuthiuron.

Quando se observa os sintomas de fitotoxicidade verifica-se que a fitotoxicidade aumenta em todos os tratamentos com o aumento da dose de tebuthiuron, sendo o feijão-de-porco a espécie que promoveu maior tolerância à aveia cultivada em seqüência. Esta apresentou sintomas agudos de intoxicação a partir da dose de $1,0 \text{ kg ha}^{-1}$, atingindo morte completa das plantas na dose de $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$, em todos os tratamentos.

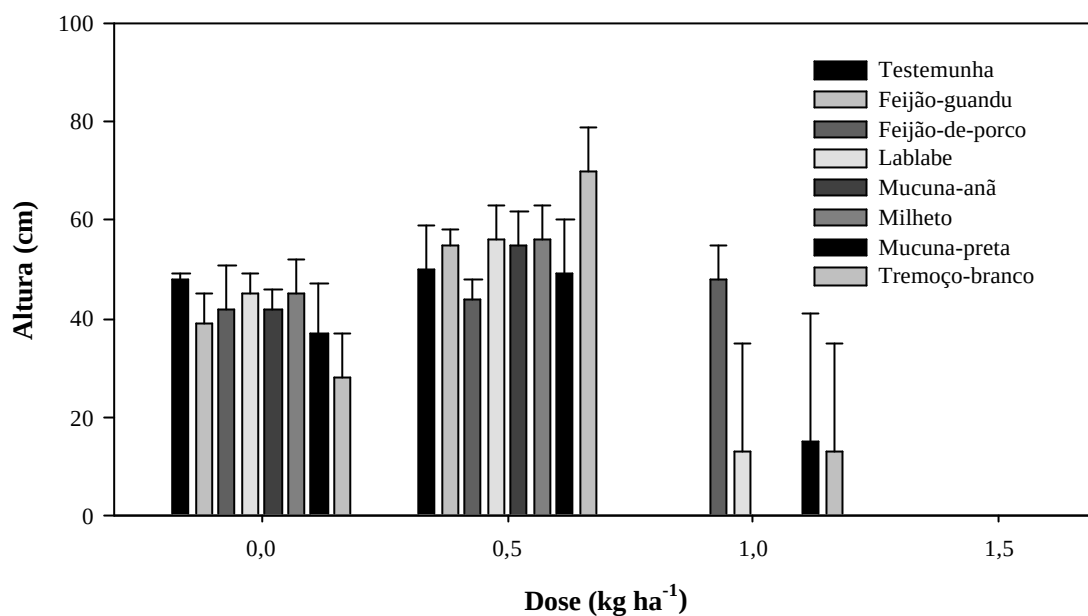


Figura 1 – Altura de plantas de aveia-preta cultivada em sucessão a sete espécies fitorremediadoras mais uma testemunha sem planta, em solo tratado com quatro doses de tebuthiuron.

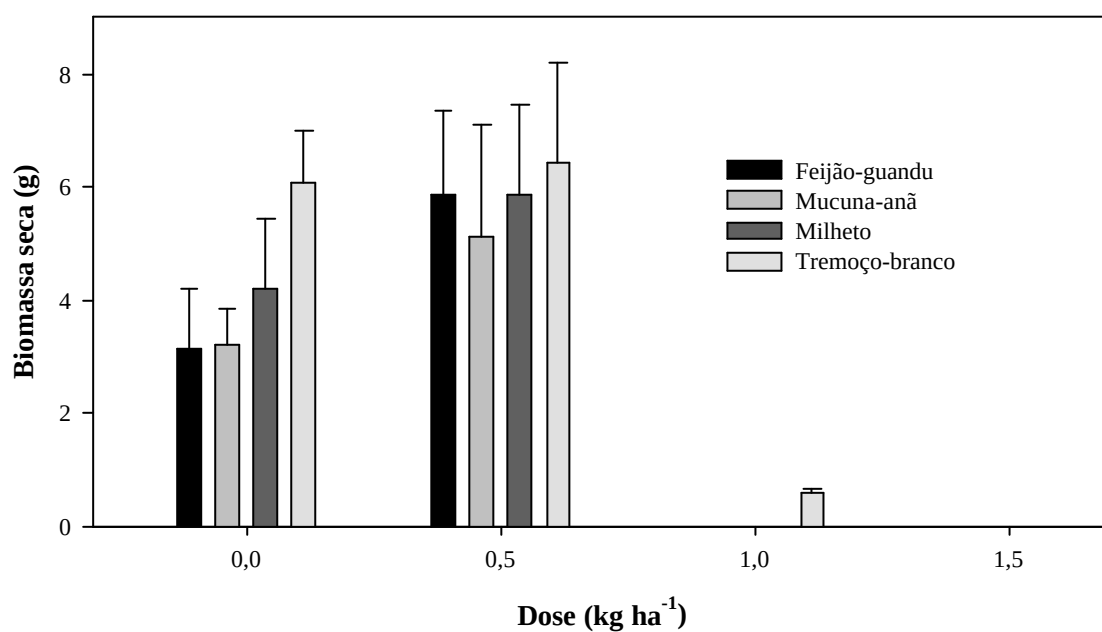


Figura 2 – Biomassa seca de plantas de aveia-preta cultivada em sucessão a feijão-guandu, mucuna-anã, milho e tremoço-branco, em solo tratado com quatro doses de tebuthiuron.

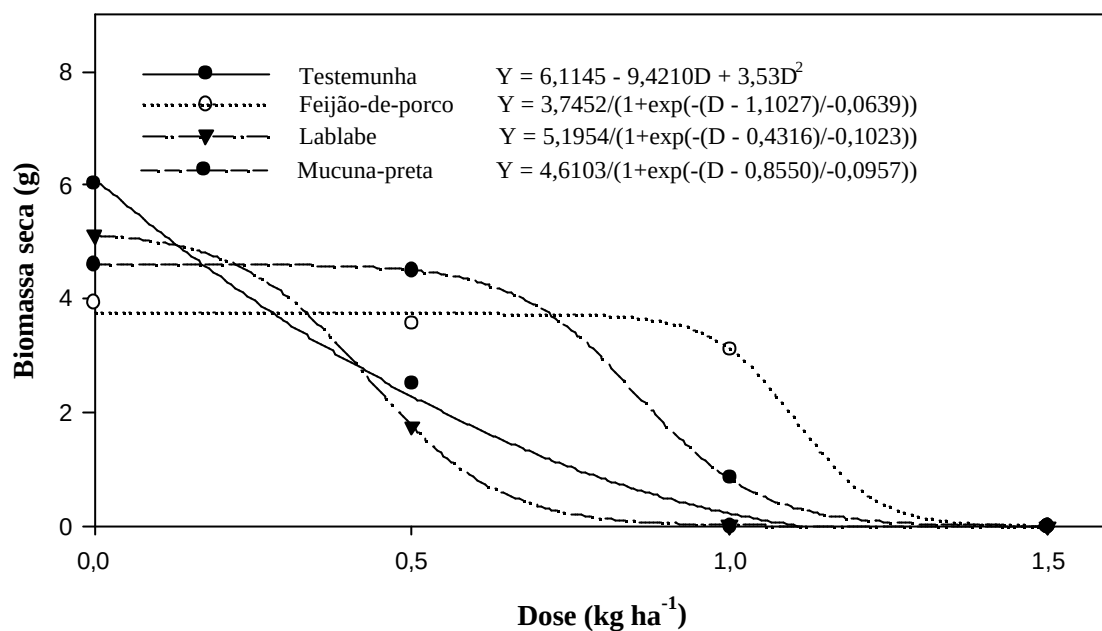


Figura 3 – Biomassa seca de plantas de aveia-preta cultivada em sucessão a feijão-de-porco, lablabe e mucuna-preta, mais uma testemunha sem planta, em solo tratado com quatro doses de tebuthiuron.

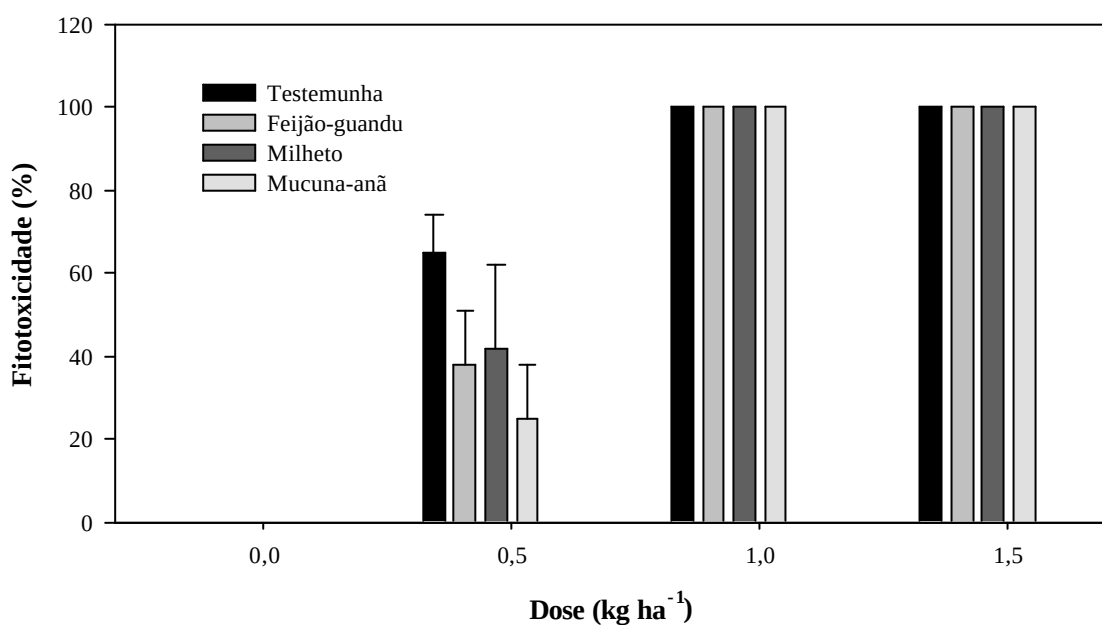


Figura 4 – Fitotoxicidade em plantas de aveia-preta cultivada em sucessão a feijão-guandu, mucuna-anã e milheto, mais uma testemunha sem planta, em solo tratado com quatro doses de tebuthiuron.

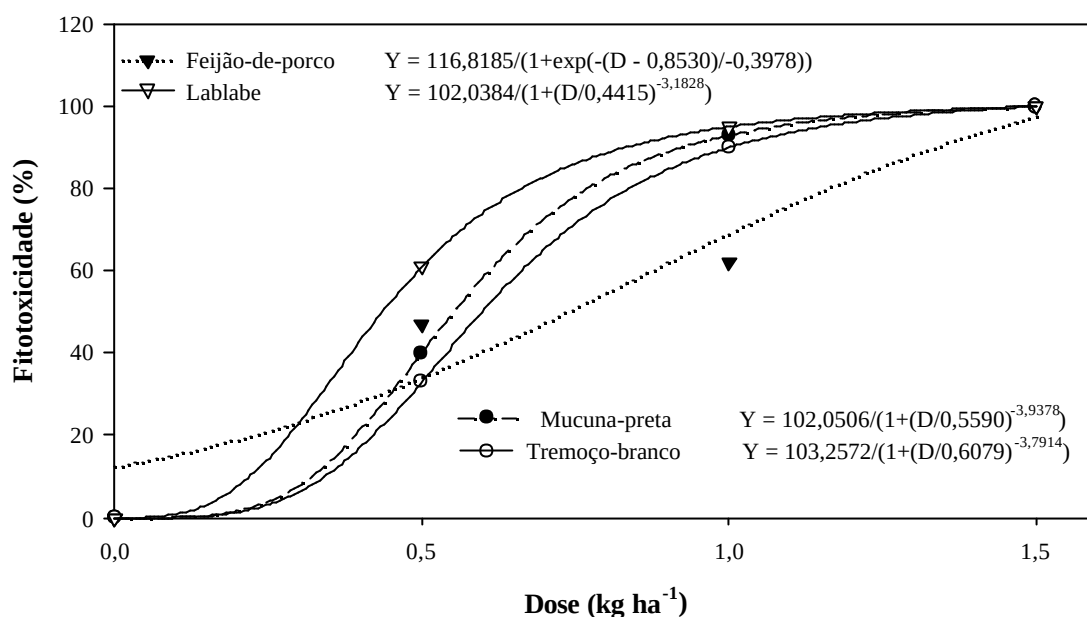


Figura 5 – Fitotoxicidade em plantas de aveia-preta cultivada em sucessão a feijão-de-porco, lablabe, mucuna-preta e tremoço-branco, em solo tratado com quatro doses de tebuthiuron.

Nota-se (Tabela 2) que a aveia-preta apresentou maior altura quando cultivada em sucessão a tremoço-branco na dose de 0,5 kg ha⁻¹, em relação à testemunha, feijão-de-porco e mucuna-preta, porém, não diferindo estatisticamente de feijão-guandu, lablabe, mucuna-anã e milho. Entretanto, em solo tratado com 1,0 kg ha⁻¹ de tebuthiuron, o feijão-de-porco foi a espécie que proporcionou maior altura de plantas e ainda resultou em ligeiro aumento, até essa dose. Na maior dose utilizada, todas as plantas morreram.

Quando se analisa a biomassa seca das plantas de aveia-preta, o comportamento é similar ao observado para altura, com evidente efeito do tratamento que envolveu feijão-de-porco sobre as plantas de aveia-preta, possibilitando seu desenvolvimento em solo com tebuthiuron, com ligeira redução de biomassa até a dose de 1,0 kg ha⁻¹.

De forma semelhante, porém inversa, nota-se que a fitotoxicidade é menor em milho, tremoço e feijão-guandu, na dose de 0,5 kg ha⁻¹. A partir dessa dose, as plantas exibiram severos sintomas de intoxicação, sendo menor em aveia-preta quando cultivada em sequência ao feijão-de-porco.

Tabela 2 – Valores médios da altura de plantas, biomassa seca da parte aérea e sintomas de fitotoxicidade de aveia-preta semeada^{1/} em sucessão a sete espécies fitorremediadoras em solo tratado com quatro doses de tebuthiuron

Espécie	Dose (kg ha ⁻¹)			
	0,0	0,5	1,0	1,5
Altura (cm)				
Testemunha	48,39 A*	49,67 B	0,00 B	0,00
Feijão-guandu	38,69 AB	55,22 AB	0,00 B	0,00
Feijão-de-porco	41,61 AB	44,33 B	47,56 A	0,00
Lablabe	44,89 A	56,83 AB	12,67 B	0,00
Mucuna-anã	41,69 AB	55,27 AB	0,00 B	0,00
Milheto	44,56 A	55,72 AB	0,00 B	0,00
Mucuna-preta	37,06 AB	48,67 B	15,00 B	0,00
Tremoço-branco	27,53 B	69,66 A	12,67 B	0,00
Biomassa seca da parte aérea (g)				
Testemunha	6,04 A	2,51 DE	0,00 B	0,00
Feijão-guandu	3,15 C	5,87 AB	0,00 B	0,00
Feijão-de-porco	3,93 BC	3,57 CD	3,12 A	0,00
Lablabe	5,12 AB	1,76 E	0,02 B	0,00
Mucuna-anã	3,22 C	5,13 ABC	0,00 B	0,00
Milheto	4,20 BC	5,85 AB	0,00 B	0,00
Mucuna-preta	4,20 BC	4,50 BC	0,83 B	0,00
Tremoço-branco	6,06 A	6,42 A	0,58 B	0,00
Fitotoxicidade (%)				
Testemunha	0	65 A	100 A	100
Feijão-guandu	0	38 BC	100 A	100
Feijão-de-porco	0	47 B	62 B	100
Lablabe	0	61 A	95 A	100
Mucuna-anã	0	42 B	100 A	100
Milheto	0	25 C	100 A	100
Mucuna-preta	0	40 B	93 A	100
Tremoço-branco	0	33 BC	90 A	100

^{1/} Semeada 60 dias após o tratamento do solo com tebuthiuron.

* Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na coluna, dentro de cada característica avaliada, não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

É interessante notar que seis das sete espécies testadas pertencem à família das leguminosas e que, apesar disso, apresentaram desempenho diferenciado quanto à fitorremediação do tebuthiuron. Anderson e Coats (1995) constataram que a família das plantas não foi um parâmetro adequado para prever o aumento da mineralização de atrazine, pois bons resultados foram obtidos com plantas de famílias diferentes, o que concorda com os melhores resultados obtidos para o feijão-de-porco.

Na tentativa de identificar espécies de plantas tolerantes a herbicidas em áreas de cultivo de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, para utilização em programas de fitorremediação, Scramin et al. (2001) observaram a ocorrência mais freqüente de oito espécies de plantas daninhas persistentes, supostamente tolerantes aos herbicidas mais comumente utilizados nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar na região, sendo elas: *Cynodon dactylon*, *Cyperus rotundus*, *Digitaria horizontalis*, *Commelina benghalensis*, *Brachiaria decumbens*, *Ephorbia heterophylla*, *Chamaesyce hirta* e *Chamaesyce hyssopifolia*. As espécies encontradas são notadamente de difícil controle na maioria das culturas em que ocorrem e apresentam alta capacidade de competição com as culturas. Assim, sua introdução com o objetivo de fitorremediar o solo poderia representar um problema posterior de infestação da área. Em razão disso, as pesquisas envolvendo espécies de interesse agrônômico, como os adubos verdes, são mais indicadas, porque, além de fácil controle, estas produzem elevada biomassa fresca e seca e, por serem leguminosas, promovem a fixação do nitrogênio atmosférico.

Analizando o efeito do cultivo anterior à soja e das doses de tebuthiuron sobre a altura, a biomassa seca da parte aérea e o IAF de plantas de soja, percebe-se a diminuição progressiva nos valores dessas três características e aumento da fitotoxicidade, com aumento da dose utilizada (Figuras 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 e Tabela 3). A partir da dose de $1,0 \text{ kg ha}^{-1}$, todas as espécies apresentaram significativa redução em sua altura e biomassa. A mesma tendência é observada na Figura 3 para fitotoxicidade e IAF, em que os adubos verdes parecem fitorremediar até a dose de $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$. Esta dose (metade da dose comercial – $1,0 \text{ kg ha}^{-1}$) representa, provavelmente, a quantidade de herbicida encontrado no solo após sua aplicação, levando-se em consideração as perdas a que está sujeito, além de sua absorção pela cultura. Por isso, esta dose pode ser tomada como uma indicação aproximada das condições normalmente encontradas nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar.

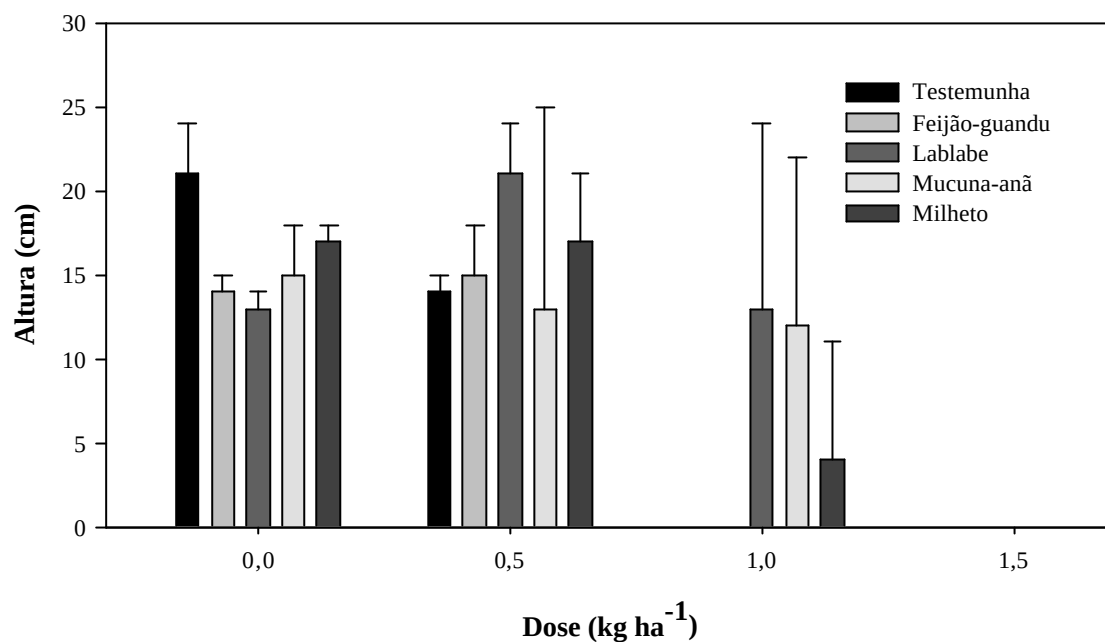


Figura 6 – Altura de plantas de soja cultivada em sucessão a feijão-guandu, lablabe, mucuna-anã e milheto, mais uma testemunha sem planta, em solo tratado com quatro doses de tebuthiuron.

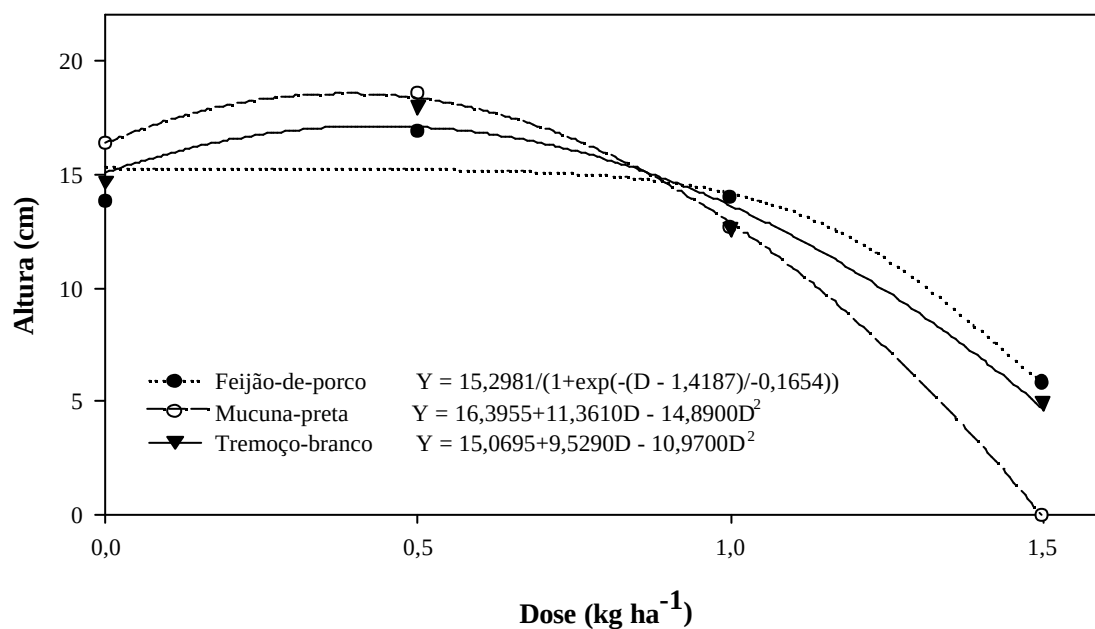


Figura 7 – Altura de plantas de soja cultivada em sucessão a feijão-de-porco, mucuna-preta e tremoço-branco, em solo tratado com quatro doses de tebuthiuron.

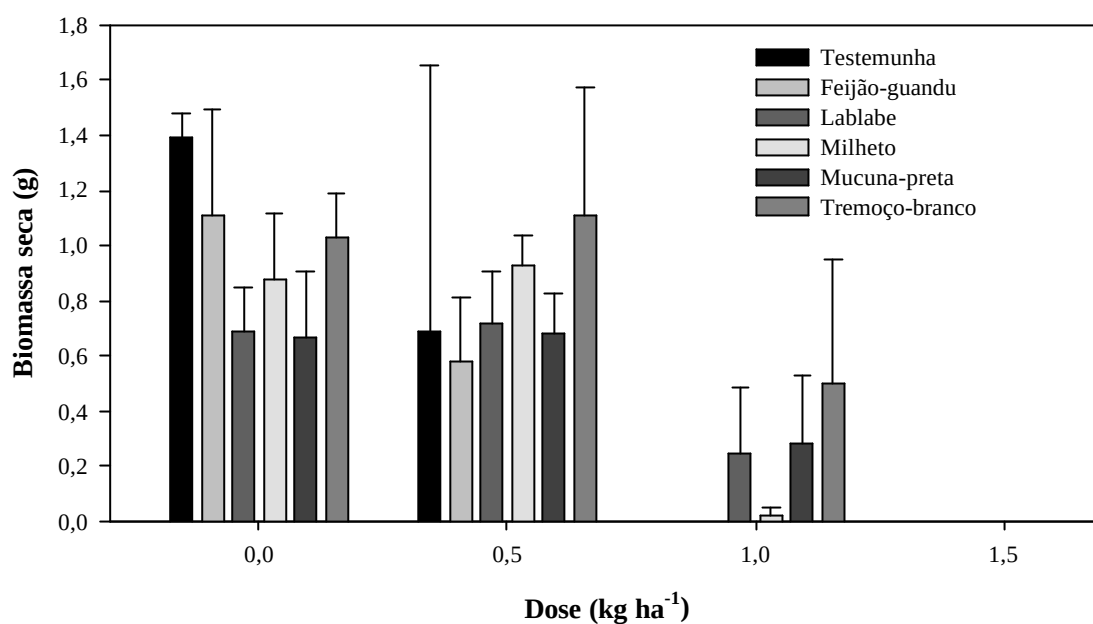


Figura 8 – Biomassa seca de plantas de soja cultivada em sucessão a feijão-guandu, lablabe, milheto, mucuna-preta e tremoço-branco, mais uma testemunha sem planta, em solo tratado com quatro doses de tebuthiuron.

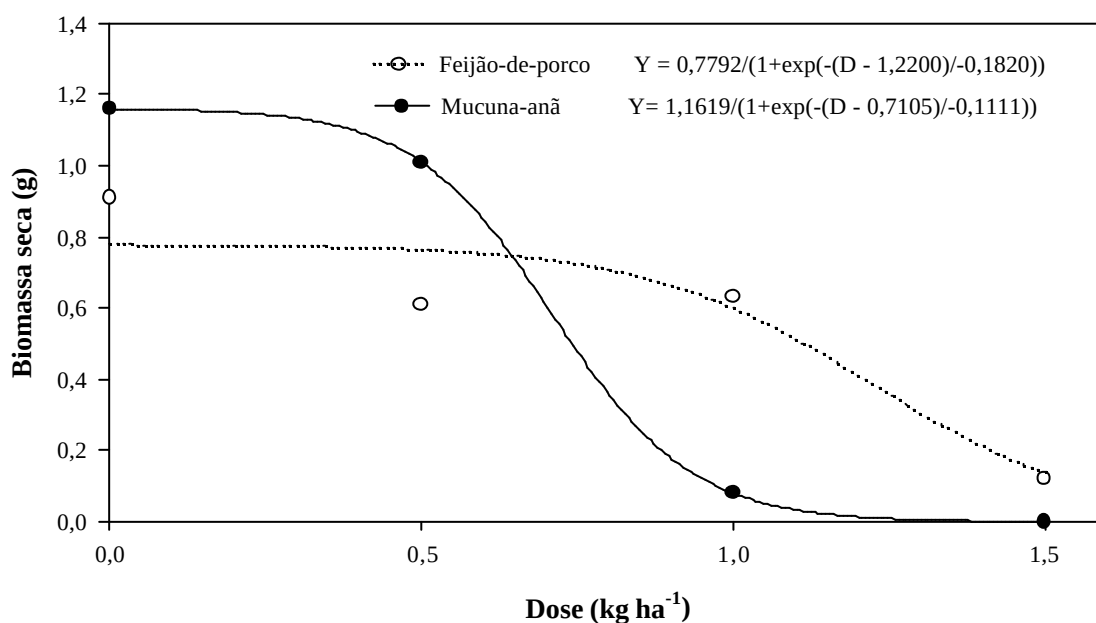


Figura 9 – Biomassa seca de plantas de soja cultivada em sucessão a feijão-de-porco, e mucuna-anã, em solo tratado com quatro doses de tebuthiuron.

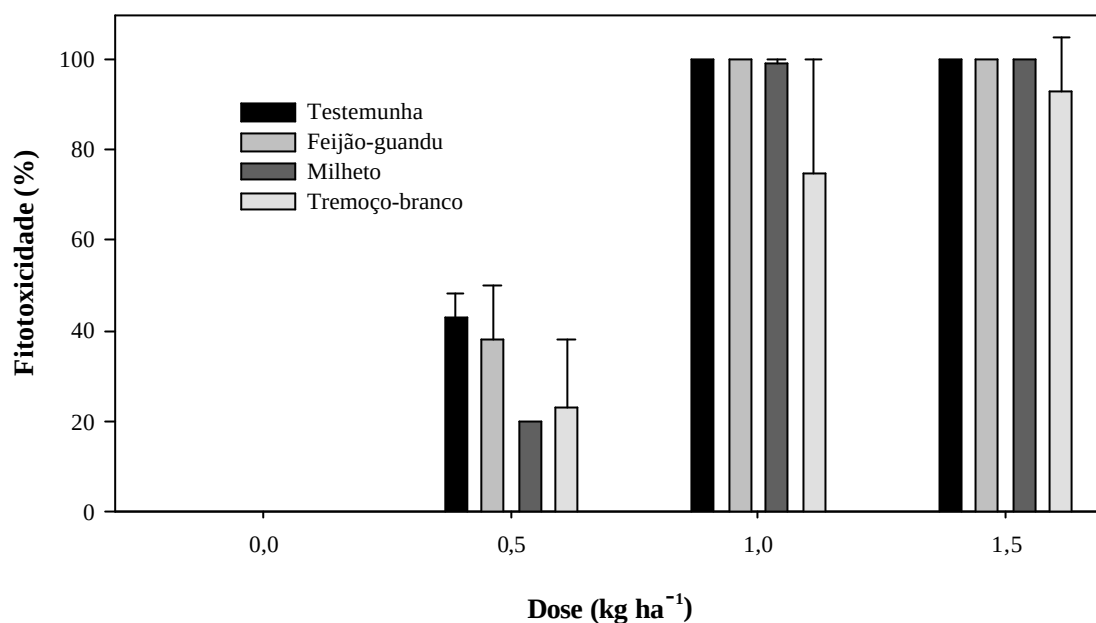


Figura 10 – Fitotoxicidade em plantas de soja cultivada em sucessão a feijão-guandu, milho e tremoço-branco, mais uma testemunha sem planta, em solo tratado com quatro doses de tebuthiuron.

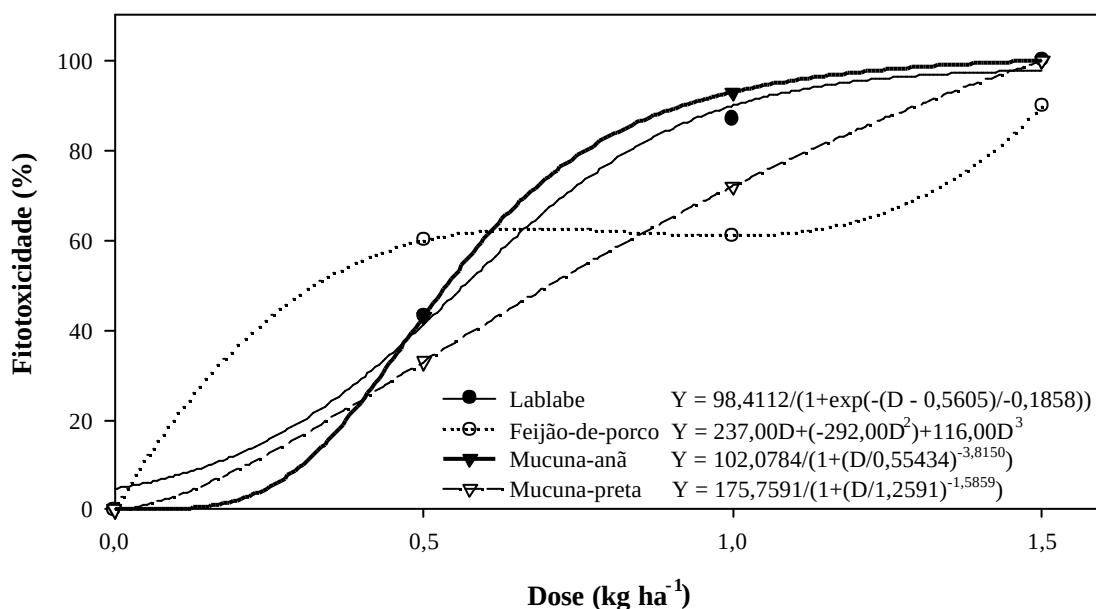


Figura 11 – Fitotoxicidade em plantas de soja cultivada em sucessão a lablabe, feijão-de-porco, mucuna-anã e mucuna-preta, em solo tratado com quatro doses de tebuthiuron.

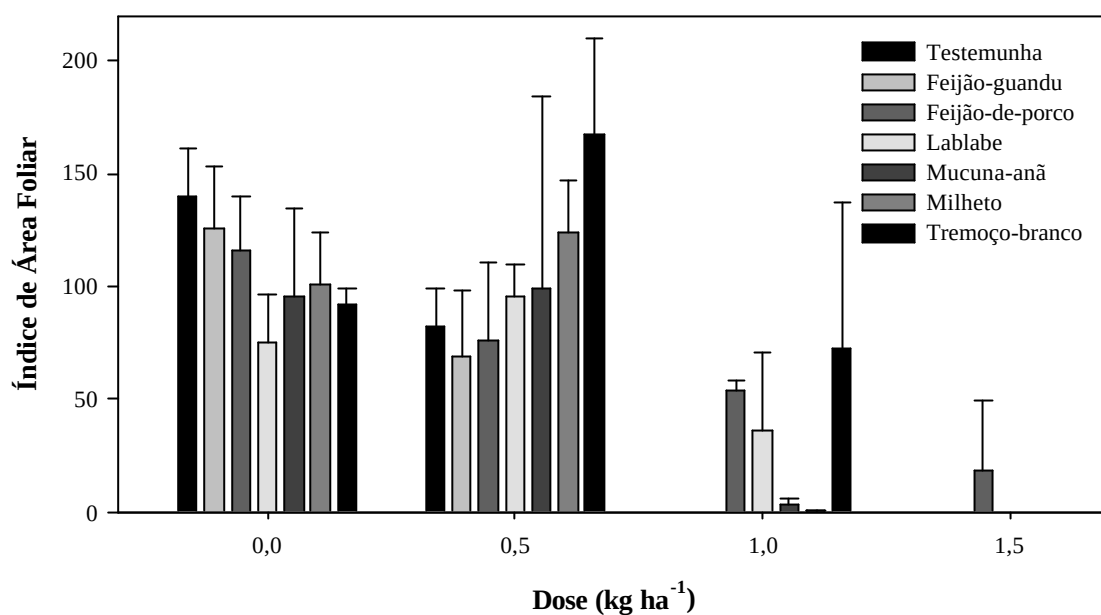


Figura 12 – Índice de Área Foliar de plantas de soja cultivada em sucessão a feijão-guandu, lablabe, mucuna-anã, milheto, mucuna-preta e tremoço-branco, mais uma testemunha sem planta, em solo tratado com quatro doses de tebuthiuron.

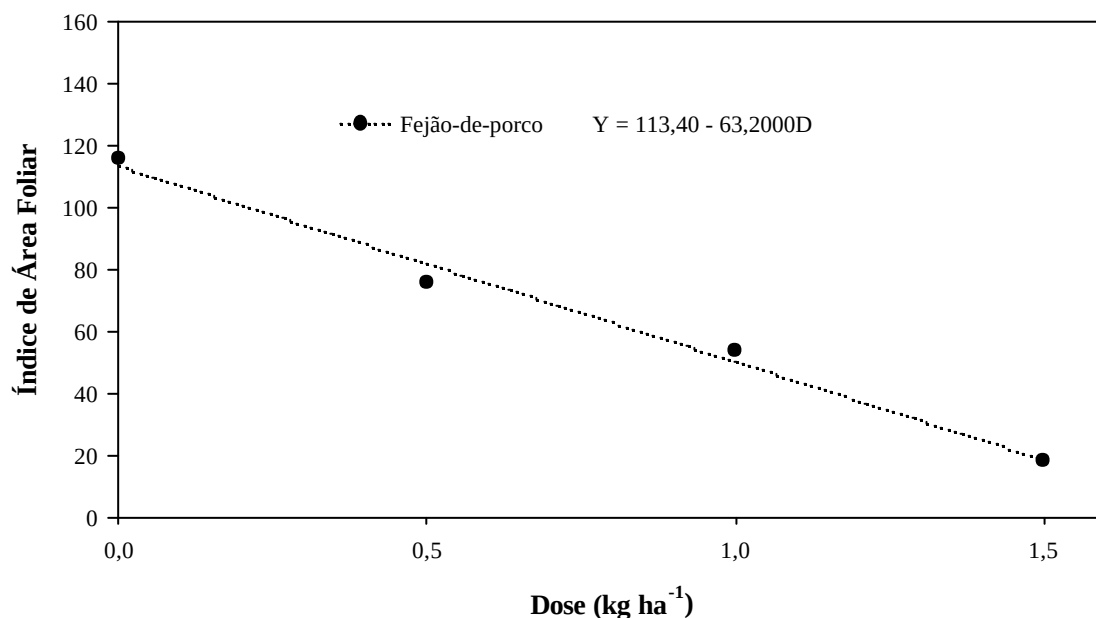


Figura 13 – Índice de Área Foliar de plantas de soja cultivada em sucessão a feijão de porco, em solo tratado com quatro doses de tebuthiuron.

Tabela 3 – Valores médios da altura de plantas, biomassa seca da parte aérea, sintomas de fitotoxicidade e índice de área foliar (IAF) de soja semeada^{1/} em sucessão a sete espécies fitorremediadoras em solo tratado com quatro doses de tebuthiuron

Espécie	Dose (kg ha ⁻¹)			
	0,0	0,5	1,0	1,5
	Altura (cm)			
Testemunha	20,83	14,06	0,00 C	0,00
Feijão-guandu	13,84	15,06	0,00 C	0,00
Feijão-de-porco	13,83	16,85	14,00 A	5,83
Lablabe	13,25	20,56	12,83 AB	0,00
Mucuna-anã	14,56	13,33	11,50 AB	0,00
Milheto	16,94	17,00	4,00 B	0,00
Mucuna-preta	16,33	18,55	12,67 AB	0,00
Tremoço-branco	14,75	18,05	12,67 AB	5,00
Biomassa seca da parte aérea (g)				
Testemunha	1,39 A	0,69	0,00 B	0,00
Feijão-guandu	1,11 AB	0,58	0,00 B	0,00
Feijão-de-porco	0,91 AB	0,61	0,63 A	0,12
Lablabe	0,69 B	0,71	0,25 B	0,00
Mucuna-anã	1,16 AB	1,01	0,83 B	0,00
Milheto	0,88 AB	0,93	0,02 B	0,00
Mucuna-preta	0,67 B	0,68	0,28 B	0,00
Tremoço-branco	1,03 AB	1,11	0,50 B	0,29
Fitotoxicidade (%)				
Testemunha	0	43 AB	100 A	100
Feijão-guandu	0	38 AB	100 A	100
Feijão-de-porco	0	60 A	61 C	90
Lablabe	0	43 AB	87 AB	100
Mucuna-anã	0	43 AB	93 AB	100
Milheto	0	20 B	99 A	100
Mucuna-preta	0	33 B	72 BC	100
Tremoço-branco	0	23 B	75 BC	93
Testemunha	139,60 A	83,21 BC	0,00 B	0,00
Feijão-guandu	125,75 A	68,63 C	0,00 B	0,00
Feijão-de-porco	116,09 AB	73,04 BC	53,75 A	18,17
Lablabe	74,63 BC	95,65 BC	35,64 AB	0,00
Mucuna-anã	95,49 ABC	98,63 BC	3,23 B	0,00
Milheto	101,21 ABC	123,82 AB	0,24 B	0,00
Mucuna-preta	56,12 C	84,68 B	23,79 AB	0,00
Tremoço-branco	91,67 ABC	167,73 A	72,39 A	0,00

^{1/} Semeada 60 dias após a aplicação de tebuthiuron.

* Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na coluna, dentro de cada característica avaliada, não diferem entre si pelo teste de Duncan, a de 5% de probabilidade.

Os resultados encontrados neste trabalho estão de acordo com os observados por Dal Pícolo e Christoffoleti (1985) e Johnsen e Morton (1991), os quais constataram o amplo espectro de ação do tebuthiuron. Esses autores observaram que a *Crotalaria juncea* apresentou crescimento inibido até 13 meses após a aplicação do herbicida. Todavia, Approbato Filho et al. (1988) verificaram inibição do crescimento de feijão e redução no rendimento de grãos de soja e de amendoim, semeados até dois anos pós a aplicação de tebuthiuron na cultura da cana-de-açúcar.

Resultados semelhantes foram obtidos por Dal Piccolo et al. (1986), os quais avaliaram o efeito fitotóxico de tebuthiuron ($0,96 \text{ kg ha}^{-1}$) e tebuthiuron + diuron ($0,96 + 0,80 \text{ kg ha}^{-1}$) em solo argilo-arenoso, com intervalo de 364 dias entre a aplicação e o plantio. Estes autores observaram que os tratamentos com tebuthiuron reduziram a produção do feijão em até 67%, em relação ao tratamento testemunha.

Verifica-se (Tabela 3) que na dose zero, apesar de não ser observado efeito fitotóxico aparente nas plantas de soja, a testemunha, sem a presença de cultivo prévio, apresentou maiores valores médios absolutos de altura, biomassa e IAF, em relação aos demais tratamentos (precedidos por adubos verdes). Nessa situação, deve ser considerada a possibilidade de ocorrência de efeito alelopático.

Quando as espécies foram semeadas em solo tratado com $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos para altura de plantas e biomassa seca da parte aérea. Todavia, foram encontradas diferenças para fitotoxicidade. Esta foi maior na soja quando precedida pelo cultivo de feijão-de-porco, em relação a milho, mucuna-preta e tremoço-branco. Quanto ao IAF da soja, o maior valor foi observado quando a ela foi precedida pelo cultivo de tremoço-branco, seguido por milho.

Na dose $1,0 \text{ kg ha}^{-1}$, nota-se redução expressiva da altura, da biomassa seca da parte aérea e do IAF e aumento da fitotoxicidade nas plantas de soja em praticamente todos os tratamentos. Nesta dose (dose comercial média, indicada para aplicação na cultura da cana-de-açúcar) o tebuthiuron encontra-se em concentração na qual o controle é efetivo para grande número de espécies

(Rodrigues e Almeida, 1998; Chang e Stritzke, 1977). A atuação do tebuthiuron na inibição do processo fotossintético foi evidente nas plantas avaliadas, evidenciada pelas elevadas notas de fitotoxicidade atribuídas. Pela obstrução do transporte de elétrons e paralisação da fotossíntese, além da ruptura das membranas (Hess e Weller, 2000), o herbicida promoveu danos severos às plantas de soja, concordando com os resultados encontrados por Steinert e Stritzke (1977).

Quando se observa o efeito promovido pela dose de 1,5 kg ha⁻¹ (maior dose utilizada), verificou-se eliminação completa de quase todas as plantas de soja, excetuando-se quando esta cultura foi precedida pelos adubos verdes feijão-de-porco e tremoço-branco. Contudo, a severidade do dano causado pelo tebuthiuron e a expressiva redução da altura, da biomassa seca da parte aérea e do IAF e o aumento da fitotoxicidade das plantas de soja revelam a suscetibilidade dessas espécies à maior dose aplicada. Pode haver a necessidade de mais de um ciclo de cultivo de feijão-de-porco e tremoço-branco, bem como de mucuna-preta e lablabe, para promover significativa redução do tebuthiuron no solo, a fim de permitir, de forma segura, a indicação do cultivo de espécies sensíveis em rotação. Isso foi o que observaram Kruger et al. (1997) em estudo para seleção de espécies capazes de descontaminar solos de quatro locais contaminados com agroquímicos, em Iowa, EUA. Houve mineralização da molécula de atrazine em três dos oito solos testados, com maior quantidade ocorrendo em solo rizosférico (35% da atrazine aplicada após nove semanas). As plantas causaram impacto positivo na dissipação de atrazine no solo, sendo significativamente menor a quantidade de atrazine extraível de solos vegetados com *K. scoparia* do que de solos sem vegetação. Esses resultados atestaram a possibilidade de se fitorremediar o herbicida atrazine no solo, porém evidenciaram que é necessário mais de um ciclo de cultivo para eliminação ou redução de atrazine a níveis não-tóxicos no solo.

CONCLUSÕES

- 1) Na dose mais elevada, nenhuma espécie conseguiu fitorremediar o tebuthiuron.
- 2) Até a dose de 1,0 kg ha⁻¹ de tebuthiuron, as espécies que melhor fitorremediaram esse herbicida foram feijão-de-porco e tremoço-branco, podendo ser indicadas para fitorremediação desse herbicida em solo

LITERATURA CITADA

ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. Screening rhizosphere soil samples for the ability to mineralize elevated concentrations of atrazine and metolachlor.

J. Environ. Sci. Health, v. 30, p. 473-84, 1995.

ANDERSON, T. A.; KRUGER, E. L.; COATS, J. R. Enhanced degradation of a mixture of three herbicides in the rhizosphere of a herbicide-tolerant plant.

Chemosphere, v. 28, p. 1551-1557, 1994.

APPROBATO FILHO, A.; GERARDI, L. E.; ANDRADE, T. L. C.; DAMACENO, A. C.; LEAVITT, J. R. C.; HIDALGO, E. Determinação da segurança de terbacil em culturas de rotação com cana-de-açúcar, após 3 a 4 aplicações anuais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE HERBICIDAS E PLANTAS DANINHAS, 17., 1988, Foz do Iguaçu, PR. **Resumos...** Foz do Iguaçu, PR, SBHED. p. 71-72.

ARTHUR, E. L.; PERKOVICH, B. S.; ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. Degradation of na atrazine and metolachlor herbicide mixture in pesticide-contaminated soils from two agrochemical dealerships in Iowa. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 119, p. 75-90, 2000.

BOVEY, R. W.; MEYER, R. E.; HEIN JR.; H. Soil persistence of tebuthiuron in the Claypan Resource Area os Texas. **Weed Sci.**, v. 30, p. 140-144, 1982.

BURKEN, J. G.; SCHNOOR, J. L. Phytoremediation: plant uptake of atrazine and role of root exudates. **J. Environ. Engin.**, v. 122, p. 958-963, 1996.

CHANG, S. S.; STRITZKE, J. F. Sorption, movement, and dissipation of tebuthiuron in soils. **Weed Sci.**, v. 25, p. 184-187, 1977.

CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Adv. Agron.**, v. 56, p. 55-114, 1996.

DAL PICCOLO, C. R.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Efeito residual de herbicidas utilizados na cultura da cana-de-açúcar sobre a *Crotalaria juncea* L. em rotação. **Saccharum**, v. 8, p. 34-38, 1985.

DAL PICCOLO, C. R.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; COLETI, J. T. Estudo da persistência de herbicidas utilizados na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) sobre a cultura do feijão em rotação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE HERBICIDAS E PLANTAS DANINHAS, 16., Campo Grande, MS, 1986. **Resumos...** Campo Grande, MS: SBHED, 1986. p. 30-31.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

FERRO, A. M.; SIMS, R. C.; BUGBEE, B. Hycrest crested wheatgrass accelerates the degradation of pentachlorophenol in soil. **J. Environ. Qual.**, v. 23, p. 272-279, 1994.

HESS, F. D.; WELLER, S. C. Mode of action in photosystem II. Photosynthesis inhibitors. In: **Herbicide action course**. Purdue University: Indiana, 2000, 942 p.

JOHNSEN, T. N.; MORTON, H. L. Long-term tebuthiuron content of grasses and shrubs on semiarid rangelands. **J. Range Manag.**, v. 44, p. 249-253, 1991.

KRUGER, E. L.; ANHALT, J. C.; SORENSON, D.; NELSON, B.; CHOUHY, A. L.; ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. Atrazine degradation in pesticide-contaminated soils: phytoremediation potential. In: KRUGER, E. L.; ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. (eds.). **Phytoremediation of soil and water contaminants**. Washington, DC, American Chemical Society, 1997. p. 54-64. (ACS Symposium Series).

MARTINS, D.; CHALITA, C. Controle químico de tremoço (*Lupinus albus*) e de nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) no manejo para plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 22., 1991, Foz do Iguaçu, PR. **Resumos...** Foz do Iguaçu, PR: SBCPD, 1991. p. 110.

McNEIL, W. K.; STRITZKE, F.; BASLER, E. Adsorption, translocation, and degradation of tebuthiuron and hexazinone in woody species. **Weed Sci.**, v. 32, p. 739-743, 1984.

MEYER, R. E.; BOVEY, R. W. Tebuthiuron formulation and placement effects on response of woody plants and soil residue. **Weed Sci.**, v. 36, p. 373-378, 1988.

NEWMAN, L. A.; SOTY, S. L.; CARY, K. L., et al. Phytoremediation of organic contaminants: a review of phytoremediation research at the university of Washington. **J. Soil Contamin.**, v. 7, p. 531-542, 1998.

PERKOVICH, B. S.; ANDERSON, T. A.; KRUGER, E. L.; COATS, J. R. Enhanced mineralization of [^{14}C] atrazine in *Kochia scoparia* rhizosferic soil from a pesticide-contaminated site. **Pestic. Sci.**, v. 46, p. 391-396, 1996.

PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; SILVA, A. A.; PROCÓPIO, S. O.; FERREIRA, L. R. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, v. 21, n. 2, p. 335-341, 2003.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 4 ed. Londrina, PR. 1998. 648 p.

SCRAMIN, S.; SKORUPA, L. A.; MELO, I. S. Utilização de plantas na remediação de solos contaminados por herbicidas – levantamento da flora existente em áreas de cultivo de cana-de-açúcar. In: MELO, I.S.; SILVA, C. M. M. S.; SCRAMIN, S.; SPESSOTO, A. **Biodegradação**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 369-371.

STEINERT; W. G.; STRITZKE, J. F. Uptake and phytotoxicity of tebuthiuron. **Weed Sci.**, v. 25, p. 390-395, 1977.

TESAR, M.; REICHENAUER, G.; SESSITSCH, A. Bacterial rhizosphere populations of black poplar and herbal plants to be used for phytoremediation of diesel fuel. **Soil Biol. Biochem.**, v. 34, p. 1883-1892, 2002.

WHISENAT, S. G.; CLARY, W. P. Tebuthiuron distribution in soil following application of pellets. **J. Environ. Qual.**, v. 16, p. 397-402, 1987.

WILSON, P. C.; WHITWELL, T.; KLAINE, S. J. Phytotoxicity, uptake, and distribution of ^{14}C -simazine in *Acorus gramineus* and *Pontederia cordata*. **Weed Sci.**, v. 48, p. 701-709, 2000.

ATIVIDADE RIZOSFÉRICA DE ESPÉCIES COM POTENCIAL PARA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS COM TEBUTHIURON

RESUMO

A ação da microbiota rizosférica, acelerando a degradação de compostos no solo, é conhecida como fitoestimulação e constitui-se em um dos principais mecanismos de fitorremediação de herbicidas no solo. Plantas tolerantes ao tebuthiuron, que sejam capazes de estimular sua microbiota rizosférica, podem ser de grande interesse na fitorremediação desse herbicida. O objetivo deste trabalho foi avaliar a atividade rizosférica de quatro espécies vegetais com potencial para fitorremediação de tebuthiuron e inferir a contribuição radicular no processo de descontaminação desse herbicida. Foi analisado o solo rizosférico de *Canavalia ensiformis*, *Estizolobium deeringianum*, *Pennisetum typhoides*, *Estizolobium aterrimum* e de uma testemunha (sem planta), com e sem a presença do tebuthiuron, na dose de $0,73 \mu\text{g g}^{-1}$. A taxa de evolução de CO_2 foi quantificada aos 1, 2, 3 e 10 dias após a aplicação dos tratamentos (DAT). Os tratamentos com herbicida foram submetidos à contaminação com $40 \mu\text{g g}^{-1}$ de tebuthiuron. Após a aplicação, mediu-se a taxa de evolução de CO_2 aos 1 e 50 dias após a aplicação dos tratamentos (DAT), empregando-se respirômetro de fluxo contínuo. A *C. ensiformis* apresentou sempre a maior taxa de evolução de CO_2 em relação às demais espécies e à testemunha, seguido da *E. aterrimum* na dose comercial. Sob concentrações maiores que a dose comercial, os valores médios de taxa de evolução de CO_2 foram maiores no solo rizosférico de *C. ensiformis*, seguido por *E. aterrimum* e *E. deeringianum*. A *C. ensiformis* a espécie com melhor desempenho nas avaliações realizadas; excetuando-se esta espécie, a contribuição rizosférica na fitorremediação de tebuthiuron em níveis acima da dose comercial não foi relevante.

Palavras-chave: respiração do solo, adubos verdes, biorremediação, despoluição.

RIZOSPHERIC ACTIVITY OF POTENTIAL SPECIES TO PHYTOREMEDIATION OF SOIL CONTAMINATED BY TEBUTHIURON

ABSTRACT

The rhizospheric microbial action, accelerating the soil compound degradation, it is known as phytostimulation and it is constituted by the main phytoremediation mechanisms of herbicides in soil. Plants tolerant to tebuthiuron, which are able to stimulate their microbial rhizospheric, can be interesting in the phytoremediation of this herbicide. This work aimed to evaluate the rhizospheric activity of four vegetal species with potential to tebuthiuron phytoremediation and infer radicular contribution to this herbicide decontamination process. It was analyzed the rhizospheric soil of *Canavalia ensiformis*, *Estizolobium deeringianum*, *Pennisetum typhoides*, *Estizolobium aterraimum* and of a control treatment (without plant), with and without tebuthiuron at $0,73 \mu\text{g g}^{-1}$. The evolution rate of CO_2 was quantified at 1, 2, 3 and 10 days after the treatments application. The treatments with herbicide were submitted to contamination with $40 \mu\text{g g}^{-1}$ of tebuthiuron. After the application, the evolution rate of CO_2 was measured at 1 and 50 days after the treatments applications, using respirometer of continuous flux. The *C. ensiformis* always presented the highest evolution rate of CO_2 in relation to the other species and to the control treatment, followed by the *S. aterraimum* at the trade dose. Under larger concentrations, the medium evolution rates values of CO_2 were larger in rhizospheric soil of *C. ensiformis*, followed by *E. aterraimum* and *E. deeringianum*. The *C. ensiformis* the specie with better acting at accomplished evaluations; except in this specie, the rhizospheric contribution in the tebuthiuron phytoremediation in levels over the trade dose was not relevant.

Key words: soil breathing, green fertilizers, bioremediation, depollution.

INTRODUÇÃO

Atualmente existe crescente interesse em técnicas biológicas para a despoluição de solos e águas contaminadas (Accioly e Siqueira, 2000), particularmente no uso de plantas (Shimp et al., 1993), chamada de fitorremediação. Ela consiste no uso de plantas e sua comunidade microbiana associada para degradar, seqüestrar ou imobilizar poluentes no solo (Siliciano e Germida, 1999). O grande atrativo dessa técnica é a possibilidade de se promover a descontaminação do local *in situ*, bem como o baixo custo, quando comparado à remoção do solo para seu tratamento (Susarla et al., 2002).

Sabe-se que as plantas podem remediar contaminantes orgânicos por: absorção radicular direta do contaminante e subsequente acúmulo de metabólitos não-fitotóxicos ou degradação do composto nos tecidos das plantas (fitodegradação); absorção foliar direta de contaminantes voláteis do ar circundante (fitovolatilização); e liberação de exsudatos e enzimas que incrementam as transformações bioquímicas e/ou a mineralização devido à atividade microbiana e de fungos micorrízicos na rizosfera (fitoestimulação) (Cunningham et al., 1996; Wilson, et al., 2000).

O principal mecanismo atuante na fitorremediação de agrotóxicos orgânicos não-clorados e herbicidas é a fitoestimulação ou rizodegradação e, em menor escala, a fitodegradação. A fitorremediação por meio desse mecanismo tem despertado interesse, em razão das elevadas taxas de remediação obtidas com a utilização de plantas que comprovadamente aumentam a degradação microbiana de compostos orgânicos danosos no solo (Anderson et al., 1993), e das diferenças significativas observadas quando são comparados solos vegetados e não-vegetados (Siliciano e Germida, 1999; Arthur et al., 2000).

Anderson et al. (1994) demonstraram que a degradação de atrazine, metolachlor e trifluralin foi significativamente maior em solos rizosféricos de *Kochia scoparia* que em solos não-vegetados. Resultados semelhantes foram obtidos por Perkovich et al. (1996), os quais observaram que a mineralização de

^{14}C -atrazine em uma mistura de atrazine e metolachlor foi maior em solos rizosféricos de *K. scoparia* que em solos sem a presença de plantas.

Em experimento realizado com o objetivo de avaliar o efeito de solos rizosféricos de 15 espécies de plantas sobre a mineralização de ^{14}C -atrazine e ^{14}C -metolachlor, Anderson e Coats (1995) constataram que *K. scoparia* apresentou a maior mineralização de ^{14}C -atrazine (62,1% do aplicado) dentre as espécies testadas, seguida por *Carduus nutans* (33,1%) e *Nepeta cataria* (24,1%). Para a mineralização do metolachlor, nenhuma das amostras de solo rizosférico exibiu resposta positiva.

Em estudo para seleção de espécies capazes de descontaminar solos de quatro locais contaminados com agroquímicos, em Iowa, EUA, Kruger et al. (1997) observaram que ocorreu rápida mineralização em três dos oito solos testados, com maior quantidade ocorrendo em solo rizosférico (35% da atrazine aplicada após nove semanas). As plantas causaram impacto positivo na dissipação de atrazine no solo, sendo significativamente menor a quantidade de atrazine extraível de solos vegetados com *Kochia* do que de solos sem vegetação.

Apesar da dificuldade de identificar espécies que reúnem, além da capacidade fitorremediadora, características desejáveis do ponto de vista agrônomo, como fácil propagação e também fácil controle ou erradicação da área, um dado importante e animador, evidenciado por Arthur et al. (2000), que comprova a possibilidade de utilização da fitorremediação, é o fato de que, nos solos rizosféricos de *K. scoparia*, a meia-vida da atrazine foi de 50 dias e, nos solos não-vegetados, de 193 dias. Esses resultados demonstram claramente o potencial da utilização de plantas como fitorremediadoras de agrotóxicos.

Normalmente, o efeito rizosférico da interface solo-raiz - que se deve à exsudação de nutrientes da planta, tais como aminoácidos e polissacarídeos - resulta na proliferação da comunidade microbiana nessa região (Hsu e Barth, 1979; Arthur et al., 2000). O número de microrganismos nos solos rizosféricos é normalmente de 5 a 10 vezes maior que naqueles não-rizosféricos, mas pode chegar a mais de 100 (Anderson et al., 1993). Por essa razão, a rizosfera pode ser um ótimo sítio de degradação de compostos orgânicos indesejáveis, devido à

comunidade microbiana associada, que pode, em alguns casos, utilizar os contaminantes como fonte de carbono primário e nutrientes. Embora os agrotóxicos possam ter efeito negativo na população microbiana, estudos mostram que bactérias podem resistir, e até mesmo proliferar, na presença de agroquímicos em elevadas concentrações, maiores que as taxas aplicadas no campo (Martesson, 1992). Para esse tipo de estudo, a taxa de evolução de CO₂ do solo tem sido utilizada como índice da atividade, do tamanho da biomassa microbiana do solo e, ainda, do metabolismo do carbono lábil do solo (Souza et al., 1999).

Para a fitorremediação de herbicidas, torna-se fundamental a identificação de espécies de plantas que estimulem a atividade e o crescimento microbiano na rizosfera, resultando no aumento das taxas de degradação do composto do solo, principalmente se este apresenta persistência elevada, como o tebuthiuron (Bovey et al., 1982).

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a atividade rizosférica de quatro espécies vegetais com potencial para fitorremediação de tebuthiuron e inferir a contribuição radicular no processo de descontaminação desse herbicida.

MATERIAL E MÉTODOS

A respiração microbiana foi usada para inferir a atividade microbiana rizosférica de diferentes espécies com potencial para fitorremediação.

O experimento foi composto por um fatorial 5 x 2 x 4 (4 espécies + 1 testemunha não-rizosférica = 5; 2 doses; e 4 épocas de avaliação), no delineamento inteiramente ao acaso, com quatro repetições. Foram semeadas e cultivadas em vasos (sem a presença de herbicida) quatro espécies pré-selecionadas, em função da tolerância e do potencial apresentado para fitorremediação de tebuthiuron. O solo usado no experimento encontra-se caracterizado na Tabela 1. As espécies avaliadas foram: feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), milheto (*Pennisetum typhoides*), mucuna-anã (*Estizolobium deeringianum*) e mucuna-preta (*Estizolobium aterrimum*). Quarenta e cinco dias após a

semeadura, procedeu-se à coleta de solo rizosférico das quatro espécies e de uma testemunha (vaso sem planta). Após a secção e eliminação da parte aérea das plantas, retirou-se o sistema radicular dos vasos cuidadosamente, agitando-o brevemente para eliminar o solo não-rizosférico. Considerou-se como rizosférico o solo fortemente aderido à raiz (1 mm), o qual foi coletado das raízes através de agitação e remoção manual. Imediatamente após a coleta o solo foi armazenado em câmara fria, a 4°C. Decorridos 15 dias, amostras de 80 g de solo foram acondicionadas em frascos de vidro de 0,5 L de capacidade, com tampa hermética, com e sem a presença de herbicida.

Os tratamentos com o herbicida receberam a aplicação de tebuthiuron na dose de $0,73 \mu\text{g g}^{-1}$, equivalente à dose média recomendada ($1,0 \text{ kg ha}^{-1}$). A taxa de evolução de CO_2 foi quantificada aos 1, 2, 3 e 10 dias após a aplicação dos tratamentos (DAT). As análises foram realizadas utilizando respirômetro de fluxo contínuo CA 2A – UI2 (Sable System, USA), no Laboratório de Biotecnologia e Biodiversidade para o Meio Ambiente da UFV.

Tabela 1 – Composição físico-química do material de solo utilizado no experimento^{1/}

Análise Granulométrica (dag kg ⁻¹)										
Argila		Silte		Areia Fina		Areia Grossa		Classificação Textural		
47		8		14		31		Argilo-arenosa		
Análise Química										
pH H ₂ O	P	K ⁺	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H + Al	CTC total	V	M	MO
	(mg dm ⁻³)		(cmol _c dm ⁻³)					(%)		(dag kg ⁻¹)
5,6	10,6	60	0,0	2,6	0,6	2,64	5,99	56	0	2,39

^{1/} Análises realizadas nos Laboratórios de Análises Físicas e Químicas de Solo do Departamento de Solos da UFV, segundo a metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA (1997).

Após as medições, os tratamentos com herbicida receberam a aplicação de $40 \mu\text{g g}^{-1}$ de tebuthiuron, simulando uma contaminação de 55 vezes superior à dose comercial (Anderson e Coats, 1995). Após a aplicação, mediu-se a taxa de evolução de CO_2 aos 1 e 50 dias após a aplicação dos tratamentos (DAAT), empregando-se o mesmo equipamento descrito anteriormente. Durante o período

de 50 dias, as amostras foram mantidas em condição ambiente, a 60% da capacidade máxima de retenção de água.

Os dados foram submetidos à análise de variância e regressão. As médias do fator qualitativo foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Para o fator quantitativo, os modelos foram escolhidos com base no coeficiente de determinação e no fenômeno biológico. Independentemente de a interação ser ou não significativa, optou-se pelo seu desdobramento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analizando a Figura 1, verifica-se o efeito significativo das doses de tebuthiuron sobre a taxa de evolução de CO_2 do solo rizosférico proveniente de feijão-de-porco, mucuna-anã, milho e mucuna-preta e da testemunha não-rizosférica, sendo suas equações apresentadas na Tabela 2. Para todos os tratamentos, a taxa de evolução de CO_2 diminuiu de forma exponencial com o tempo de avaliação; a intensidade da queda foi semelhante para as espécies testadas.

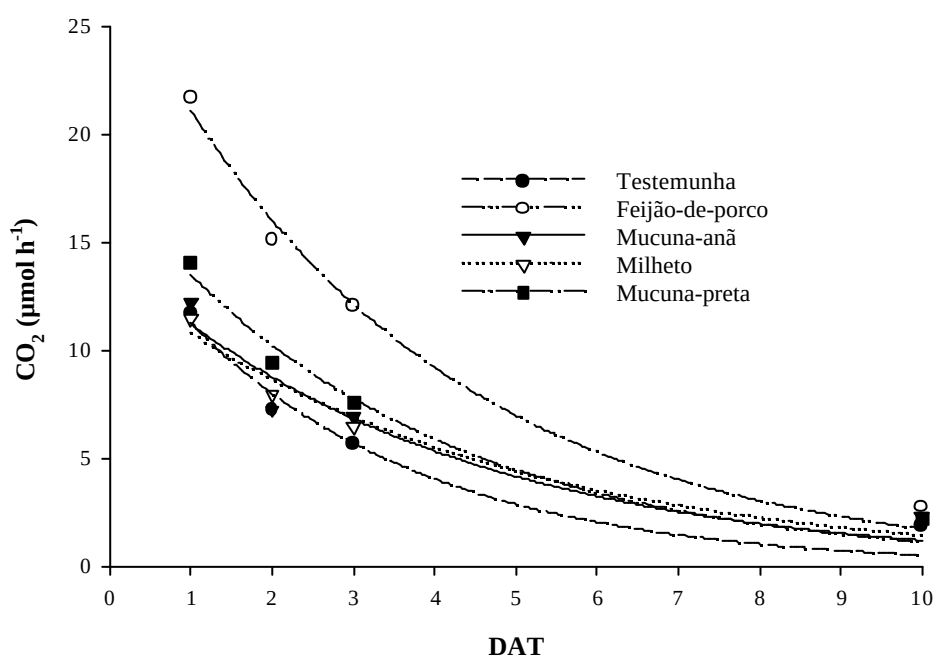


Figura 1 – Valores médios de taxa de evolução de CO_2 em solo rizosférico de feijão-de-porco, mucuna-anã, milho e mucuna-preta, em relação à testemunha de solo não-rizosférico, aos 1, 2, 3 e 10 dias após a aplicação de $0,73 \mu\text{g g}^{-1}$ de tebuthiuron.

Tabela 2 – Equações de regressão e coeficiente de determinação para os valores médios de taxa de evolução de CO₂ em solo rizosférico de quatro espécies mais uma testemunha não-rizosférica, em quatro épocas de avaliação

Espécie	Equações Ajustadas	R ²
Testemunha	$\hat{Y} = 15,8056 \exp^{(-0,3411 \cdot \text{DIA})}$	0,96
Feijão-de-porco	$\hat{Y} = 27,7953 \exp^{(-0,2766 \cdot \text{DIA})}$	0,98
Mucuna anã	$\hat{Y} = 14,3908 \exp^{(-0,2484 \cdot \text{DIA})}$	0,92
Milheto	$\hat{Y} = 13,4825 \exp^{(-0,2232 \cdot \text{DIA})}$	0,96
Mucuna preta	$\hat{Y} = 17,7190 \exp^{(-0,2755 \cdot \text{DIA})}$	0,97

Contrariamente, no trabalho desenvolvido por Perkovich et al. (1996), o solo rizosférico de *Kochia* começou a mineralizar atrazine após seis dias, e o solo não-vegetado, após 12 dias de incubação, o que concorda com Souza (1994), segundo o qual, quando um herbicida é aplicado no solo, há um período de enriquecimento do meio com uma fonte de carbono. Na fase inicial, dependendo dos diferentes herbicidas, há uma pequena taxa de degradação. Esta fase parece corresponder a um período de adaptação dos microrganismos, que produzem as enzimas essenciais para degradar o novo substrato. Em seguida, a população microbiana aumenta, acelerando o processo de decomposição dos substratos.

Essas informações indicam que as elevadas taxas encontradas nos tratamentos nas primeiras avaliações podem ser devidas à decomposição da matéria orgânica do solo e não à degradação do tebuthiuron. No entanto, como o solo utilizado e as condições de umidade foram as mesmas, depreende-se que a comunidade microbiana associada às raízes de feijão-de-porco foi a maior ou a mais ativa dentre os tratamentos.

Observa-se que, até três DAT, o solo rizosférico de feijão-de-porco apresentou sempre a maior taxa de evolução de CO₂ em relação às demais espécies e à testemunha, seguido da mucuna-preta (Tabela 3). Este resultado sugere maior atividade rizosférica nesta espécie, corroborando sua indicação para a fitorremediação de tebuthiuron. Aos 10 DAT, as diferentes espécies não mais diferiram

quanto à taxa de CO₂ evoluído, porém manteve-se a tendência de maior evolução de CO₂ no solo rizosférico de feijão-de-porco.

Analizando ainda a Tabela 3 verifica-se que milho e mucuna-anã não diferiram da testemunha não-rizosférica aos 1, 2 e 10 DAT, apresentando diferença apenas no terceiro dia de avaliação. É possível que isso se deva à ausência de espécies microbianas, associadas às espécies e no solo não-rizosférico, capazes de degradar essa molécula (Prata et al., 2000). Esse resultado indica que a contribuição rizosférica destas duas espécies na detoxificação do tebuthiuron parece não ser relevante, sugerindo que outros mecanismos, como a fitodegradação, devem estar associados à tolerância que essas espécies exibiram ao tebuthiuron em ensaios anteriores. Resultados semelhantes foram obtidos por Alvey e Crowley (1996), que não encontraram diferenças entre a mineralização de atrazine em solos plantados com milho (usado como planta fitorremediadora) e a verificada naqueles sem planta, indicada pela evolução de ¹⁴CO₂, apesar do aumento evidenciado na população de bactérias mineralizadoras de atrazine, ao final do período de incubação, nos solos que receberam plantas.

Pela Tabela 4, verifica-se que o solo rizosférico de feijão-de-porco apresentou maior taxa de evolução de CO₂ tanto na dose zero (sem herbicida) quanto na presença do tebuthiuron (dose 0,73 µg g⁻¹). A mucuna-preta foi superior à mucuna-anã, ao milho e à testemunha, que não diferiram entre si. Quando se compara a respiração nos tratamentos em função das doses, apenas feijão-de-porco e mucuna-anã diferiram na presença e na ausência do herbicida; o primeiro teve maior evolução de CO₂ no solo com herbicida, e o segundo, no solo sem herbicida. Há a possibilidade de que a microbiota associada às raízes do feijão-de-porco possa, além de tolerar o tebuthiuron, utilizá-lo como substrato para seu metabolismo, como ocorre com a espécie *K. scoparia*, fitorremediadora de atrazine (Anderson e Coats, 1995; Perkovich et al., 1995). No solo rizosférico de mucuna-anã ocorreu queda na evolução de CO₂, que pode ser explicada pelo provável efeito tóxico do tebuthiuron sobre a microbiota, reduzindo a respiração basal.

Tabela 3 – Valores médios de taxa de evolução de CO₂ em solo rizosférico de quatro espécies e de uma testemunha não-rizosférica, em quatro épocas de avaliação

Espécie	Dias após a aplicação de tebuthiuron			
	1	2	3	10
Testemunha	11,72 ^{1/} C	7,24 C	5,66 D	1,84
Feijão-de-porco	21,70 A	15,12 A	12,04 A	2,75
Mucuna-anã	12,22 C	7,24 C	6,95 BC	2,27
Milheto	11,47 C	7,96 C	6,48 CD	2,33
Mucuna-preta	14,06 B	9,42 B	7,59 B	2,17

^{1/} $\mu\text{mol h}^{-1}$. *Médias seguidas por uma mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 4 – Valores médios de taxa de evolução de CO₂ em solo rizosférico de quatro espécies com e sem aplicação de tebuthiuron

Espécie	Dose ($\mu\text{g g}^{-1}$)	
	0,0	0,73
Testemunha	6,82 ^{1/} a C	6,41 a C
Feijão-de-porco	12,66 b A	13,15 a A
Mucuna-anã	7,43 a C	6,91 b C
Milheto	7,24 a C	6,88 a C
Mucuna-preta	8,41 a B	8,21 a B

^{1/} $\mu\text{mol h}^{-1}$. *Médias seguidas por uma mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Quando os tratamentos foram submetidos à elevada contaminação com a aplicação de tebuthiuron, em uma concentração 55 vezes maior que a dose comercial, feijão-de-porco, mucuna-preta e mucuna-anã tiveram os maiores valores de taxa de evolução de CO₂, sendo superiores à da testemunha, o que não ocorreu com o milheto (Tabela 5). Na ausência do herbicida (dose zero), as amostras de solo rizosférico de feijão-de-porco apresentaram novamente maior respiração.

Analisando a respiração no solo em função das doses (Tabela 5), dentro de cada espécie, nota-se que a testemunha não-rizosférica e a mucuna-preta foram significativamente superiores na presença do herbicida, quando comparado ao

solo sem herbicida. Os demais tratamentos, em valores absolutos, demonstraram a mesma tendência. Isso pode representar, como observado com a aplicação da dose comercial, uma adaptação da microbiota nativa do solo ao tebuthiuron, utilizando-o como substrato (Souza, 1994).

Pela Tabela 6, verifica-se que, na primeira avaliação, os valores médios da taxa de evolução de CO₂ foram maiores no solo rizosférico de feijão-de-porco em relação à testemunha e ao milheto. Aos 50 DAT, feijão-de-porco diferiu da testemunha, milheto e mucuna-preta. Ao comparar a respiração aos 1 e 50 dias após a reaplicação no solo, verifica-se que em todas as espécies a taxa de evolução de CO₂ teve redução significativa, da primeira para a última avaliação. Isso pode ter ocorrido em razão do esgotamento das fontes nutricionais e da morte das células microbianas, estando de acordo com as observações de Anhalt et al. (2000) e Arthur et al. (2000).

Além disso, esse decréscimo sugere que a ausência prolongada de uma planta viva sobre o solo tenha resultado em influência negativa na atividade microbiana, o que concorda com os resultados encontrados por Perkovich et al. (1996). Por outro lado, a progressiva redução que se observa na respiração do solo com o tempo de aplicação pode indicar que o tebuthiuron não degradado possa estar adsorvido aos colóides minerais e, principalmente, orgânicos do solo (Meyer e Bovey, 1988; Souza et al., 2001).

Tabela 5 – Valores médios de taxa de evolução de CO₂ em solo rizosférico de quatro espécies mais uma testemunha não-rizosférica, com e sem aplicação de tebuthiuron

Espécie	Dose (µg g ⁻¹)	
	0	40,0
Testemunha	1,72 b ^{1/} C	2,23 a C
Feijão-de-porco	2,64 a A	2,82 a A
Mucuna-anã	2,37 a AB	2,38 a B
Milheto	2,09 a B	2,15 a C
Mucuna-preta	2,23 b B	2,60 a AB

^{1/} µmol h⁻¹. *Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 6 – Valores médios de taxa de evolução de CO₂ em solo rizosférico de quatro espécies mais uma testemunha não-rizosférica, tratado com tebuthiuron na dose de 40 µg g⁻¹, em duas datas após a aplicação dos tratamentos (DAT)

Espécie	DAT	
	1	50
Testemunha	2,28 ^{1/} a C	1,67 b B
Feijão-de-porco	3,33 a A	2,13 b A
Mucuna-anã	2,84 a AB	1,91 b AB
Milheto	2,41 a C	1,83 b B
Mucuna-preta	3,03 a AB	1,80 b B

^{1/} µmol h⁻¹. *Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A adsorção pode reduzir a sua concentração na solução do solo em níveis que não induziriam os microrganismos a produzir as enzimas necessárias à sua degradação (Medsen, 1991).

Na Tabela 7, ao se comparar a média dos tratamentos com e sem tebuthiuron, observa-se que houve significativa redução da taxa de evolução de CO₂ da primeira medição para aquela realizada aos 50 dias após a reaplicação. No entanto, não houve diferença significativa entre as duas doses testadas. Essa não-diferenciação entre a média dos tratamentos com e sem herbicida indica que, com exceção do feijão-de-porco, a tolerância das espécies testadas parece não estar relacionada com a degradação microbiana do tebuthiuron.

Tabela 7 – Valores médios de taxa de evolução de CO₂ em solo rizosférico de quatro espécies mais uma testemunha não-rizosférica, com e sem aplicação de tebuthiuron na dose de 40 µg g⁻¹, em duas datas após a aplicação dos tratamentos (DAT)

Dose (µg g ⁻¹)	DAT	
	1	50
0	2,58 ^{1/} a B	1,85 b A
40	2,98 a A	1,89 b A

^{1/} µmol h⁻¹. *Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey ao 5% de probabilidade.

Segundo Rodrigues e Almeida (1998), o principal processo de degradação da molécula de tebuthiuron no solo é químico e, secundariamente, microbiano, ao contrário do glyphosate, por exemplo, que é facilmente metabolizado pela microbiota do solo (Souza et al., 1999). Além disso, o transporte do tebuthiuron para o sítio de ação nas folhas parece facilitado por suas características físico-químicas K_{ow} e solubilidade (Briggs et al., 1982).

Não obstante, em alguns trabalhos foram identificados microrganismos responsáveis pela degradação de herbicidas derivados da uréia (Hill et al., 1955). Murray et al. (1969) observaram que *Aspergilli niger* foi mais efetivo, dentre três fungos avaliados, na degradação de cinco herbicidas derivados da uréia (monuron, diuron, norea, fenuron e fluometuron), cujos resultados foram comprovados através de bioensaio realizado com aveia; Tweedy et al. (1970) constataram que *Talaromyces wortmanii* foi capaz de degradar 37% do herbicida metobromuron em 18 dias após a incubação, e *Fusarium oxysporum*, 11%.

De maneira geral, os valores de taxa de evolução de CO_2 encontrados neste experimento foram baixos e coincidem com os verificados por Correia (2000), trabalhando com ^{14}C -atrazine.

CONCLUSÕES

- 1) A maior evolução de CO_2 no solo rizosférico tratado com tebuthiuron ocorreu no proveniente de feijão-de-porco.
- 2) Sob alta concentração de tebuthiuron no solo, ocorreu maior evolução de CO_2 no solo rizosférico de feijão-de-porco, seguido por mucuna-preta e mucuna-anã.
- 3) Excetuando-se o feijão-de-porco, a contribuição rizosférica para fitorremediação de tebuthiuron em níveis de elevada contaminação do solo não foi relevante.

LITERATURA CITADA

- 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.
- ALVEY, S.; CROWLEY, D. E. Survival and activity of na atrazine-mineralizing bacterial consortium in rhizosphere soil. **Environ. Sci. Technol.**, v. 27, p. 1596-1603, 1996.
- ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. Screening rhizosphere soil samples for the ability to mineralize elevated concentrations of atrazine and metolachlor. **J. Environ. Sci. Health, B**, v. 30, p. 473-484, 1995.
- ANDERSON, T. A.; GUTHRIE, E. A.; WALTON, B. T. Bioremediation in the rhizosphere: plant roots and associated microbes clean contaminated soil. **Environ. Sci. Technol.**, v. 27, p. 2630-2636, 1993.
- ANDERSON, T. A.; KRUGER, E. L.; COATS, J. R. Enhanced degradation of a mixture of three herbicides in the rhizosphere of a herbicide-tolerant plant. **Chemosphere**, v. 28, p. 1551-1557, 1994.
- ANHALT, J. C.; ARTHUR, E. L.; ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. Degradation of atrazine, metolachlor, and pendimethalin in pesticide-contaminated soils: effects of aged residues on soil respiration and plant survival. **J. Environ. Sci. Health, B**, v. 35, p. 417-438, 2000.
- ARTHUR, E. L.; PERKOVICH, B. S.; ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. Degradation of na atrazine and metolachlor herbicide mixture in pesticide-contaminated soils from two agrochemical dealerships in Iowa. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 119, p. 75-90, 2000.
- BOVEY, R.W.; MEYER, R. E.; HEIN JR., H. Soil persistence of tebuthiuron in the Clypan resource area of Texas. **Weed Sci.**, v. 30, p. 140-144, 1982.
- BRIGGS, G. G.; BROMILOW, R. H.; EVANS, A. A. Relationship between lipophilicity and root uptake and translocation of non-ionized chemicals by barley. **Pestic. Sci.**, v. 13, p. 495-504, 1982.
- CORREIA, F. V. **Distribuição e degradação do herbicida atrazina em solo Podzólico Vermelho-Amarelo sob condições de clima tropical**. Lavras, 2000. 83 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.
- CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Adv. Agron.**, v. 56, p. 55-114, 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA.
Manual de métodos de análise de solo. 2 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

HILL, G. D.; MCGAHEN, J. W.; BAKER, H. M.; FINNERTY, D. W.;
BINGEMAN, C. W. The fate of substitute urea herbicides in agricultural soils.
Agron. J., v. 47, p. 93-104, 1955.

HSU, T. S.; BARTHA, R. Accelerated mineralization of two organophosphate insecticides in the rhizosphere. **Appl. Environ. Microbiol.**, v. 37, p. 36-41, 1979.

KRUGER, E. L.; ANHALT, J. C.; SORENSON, D.; NELSON, B.; CHOUHY, A. L.; ANDERSON T. A.; COATS, J. R. Atrazine degradation in pesticide-contaminated soils: phytoremediation potential. In: **Phytoremediation of soil and water contaminants**. Washington, DC: American Chemical Society, 1997. p. 54-64.

MADSEN, E. L. Determining *in situ* biodegradation: facts and challenges. **Environ. Sci. Technol.**, v. 25, p. 1663-1673, 1991.

MARTENSSON, A. M. Effects of agrochemicals and heavy metals on fast-growing rhizobia and their symbiosis with small-seeded legumes. **Soil Biol. Biochem.**, v. 24, p. 435-445, 1992.

MURRAY, D. S.; RIECK, W. L.; LILND, J. Q. Microbial degradation of five substituted urea herbicides. **Weed Sci.**, v. 17, p. 52-55, 1969.

PERKOVICH, B. S.; ANDERSON, T. A.; KRUGER, E. L.; COATS, J. R. Enhanced mineralization of [¹⁴C] atrazine in *Kochia scoparia* rhizospheric soil from a pesticide-contaminated site. **Pestic. Sci.**, v. 46, p.391-396, 1996.

PRATA, F.; LAVORENTI, A.; REGINATO, J. B.; TORNISIELO, V. L. Degradação e adsorção de diuron em solos tratados com vinhaça. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 24, p. 217-223, 2000.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 4 ed. Londrina, PR: 1998. 648 p.

SHIMP, J. F.; TRACY, J. C.; DAVIS, L. C.; LEE, E.; HUANG, W.;
ERICKSON, L. E.; SHNOOR, J. L. Beneficial effects of plants in the remediation of soil and groundwater contaminated with organic materials. **Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.**, v. 23, p. 41-77, 1993.

SILICIANO, S. D.; GERMIDA, J. J. Enhanced phyoremediation of chlorobenzoates in rhizosphere soil. **Soil Biol. Biochem.**, v. 31, p. 299-305, 1999.

SOUZA, A. P. **Atividade de oxyfluorfen, 2,4-D e glifosate, em solos de diferentes texturas na presença e na ausência de composto orgânico.** 1994. 71 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1994.

SOUZA, A. P.; FERREIRA, F. A.; SILVA, A. A.; CARDOSO, A. A.; RUIZ, H. A. Respiração microbiana do solo sob doses de glyphosate e de imazapyr. **Planta Daninha**, v. 17, p. 387-398, 1999.

SUSARLA, S.; MEDINA, V. F.; McCUTCHEON, S. C. Phytoremediation: na ecological solution to organic chemical contamination. **Ecol. Engin.**, v. 18, p. 647-658, 2002.

TWEEDY, B. G.; LOE PPKI, C.; ROSS, J. A. Metabolism of 3-(p-Bromophenyl)-1-methoxy-1-methylurea (Metabromuron) by selected soil microorganisms. **J. Agric. Food Chem.**, v. 18, p. 851-853, 1970.

WILSON, P. C.; WHITWELL, T.; KLAINE, S. J. Metalaxyl and simazine toxicity to and uptake by *Typha latifolia*. **Ach. Environ. Contam. Toxicol.**, v. 39, p. 282-288, 2000.

2. CONCLUSÕES

Com base nos resultados, chegou-se às seguintes conclusões:

- As espécies que apresentam maior tolerância ao tebuthiuron foram feijão-de-porco, mucuna-preta, mucuna-anã, tremoço-branco e milheto, indicando potencial utilização para posteriores estudos de fitorremediação desse herbicida no solo. Feijão-guandu e lablabe exibiram tolerância intermediária ao tebuthiuron, o que pode ser de interesse para estudos de fitorremediação desse herbicida no solo quando o nível de resíduo for baixo.
- No bioensaio no próprio vaso, constatou-se que na dose mais elevada nenhuma espécie conseguiu fitorremediar o tebuthiuron. Até a dose de $1,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de tebuthiuron, as espécies que melhor fitorremediaram esse herbicida foram feijão-de-porco e tremoço-branco, possibilitando melhor desenvolvimento de aveia-preta e soja.
- A maior evolução de CO_2 ocorreu no solo rizosférico de feijão-de-porco, em solo tratado com a dose comercial de tebuthiuron e sob alta concentração desse herbicida no solo, seguido por mucuna-preta e mucuna-anã. Com exceção do feijão-de-porco, a contribuição rizosférica para fitorremediação de tebuthiuron em níveis de elevada contaminação do solo não foi relevante.