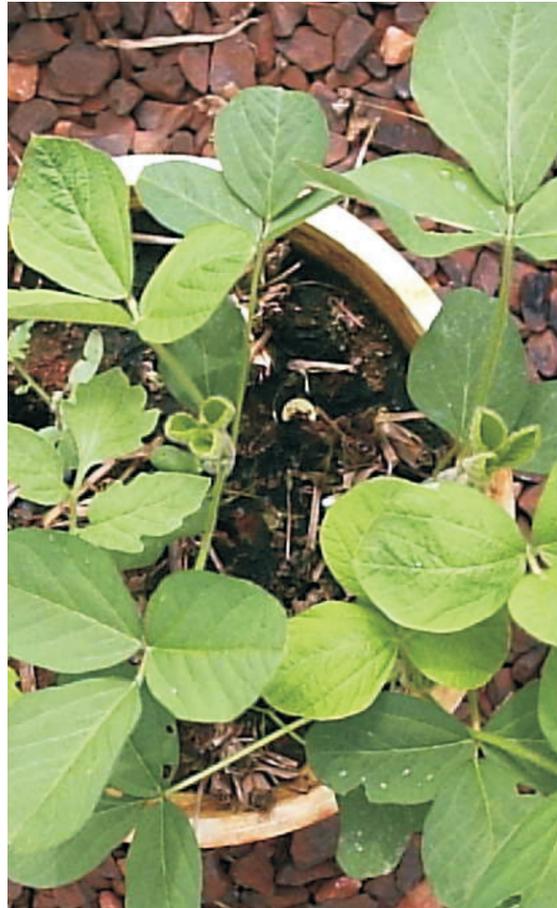


Fitorremediação de Solos com Resíduos de Herbicidas





*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro de Pesquisa Agropecuária dos Tabuleiros Costeiros
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 1678-1953

Dezembro, 2009

Documentos 156

Fitorremediação de Solos com Resíduos de Herbicidas

Sergio de Oliveira Procópio
Fábio Ribeiro Pires
José Barbosa dos Santos
Antonio Alberto da Silva

Aracaju, SE
2009

Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/index.php?idpagina=fixas&pagina=publicacoesonline>

Embrapa Tabuleiros Costeiros

Av. Beira Mar, 3250, Aracaju, SE, CEP 49025-040

Caixa Postal 44

Fone: (79) 4009-1344

Fax: (79) 4009-1399

www.cpatc.embrapa.br

sac@cpatc.embrapa.br

Comitê Local de Publicações

Presidente: Ronaldo Souza Resende

Secretária-Executiva: Raquel Fernandes de Araújo Rodrigues

Membros: Semíramis Rabelo Ramalho Ramos, Julio Roberto Araujo de Amorim, Ana da Silva Lédo, Flávia Karine Nunes Pithan, Ana Veruska Cruz da Silva Muniz, Hymerson Costa Azevedo.

Supervisora editorial: Raquel Fernandes de Araújo Rodrigues

Revisão Bibliográfica: Josete Cunha Melo

Tratamento de ilustrações: Bryene Santana de Souza Lima

Editoração eletrônica: Bryene Santana de Souza Lima

Fotos da capa: Sergio de Oliveira Procópio

Foto da capa à esquerda: Soja e tomate em solo com resíduos de picloram sem fitorremediação

Foto da capa à direita: Soja e tomate em solo com resíduos de picloram com fitorremediação

1ª edição

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Tabuleiros Costeiros

Procópio, Sergio de Oliveira

Fitorremediação de solos com resíduos de herbicidas / Sérgio de Oliveira Procópio ... [et al.]. – Aracaju : Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2009.

32p. (Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1678-1953; 53).

Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/index.php?idpagina=fixas&pagina=publicacoesonline>

1. Fitorremediação. 2. Herbicida. 3. Defensivo agrícola. 4. Solo. 5. Contaminação do solo. I. Pires, Fábio Ribeiro. II. Santos, José Barbosa dos. III. Silva, Antônio Alberto. IV. Título. V. Série.

CDD 631.81

©Embrapa 2009

Autores

Sergio de Oliveira Procópio

Pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros
Caixa Postal 44, Av. Beira Mar 3250
Aracaju/SE, CEP 49025-040
Tel.: (79) 4009-1392
E-mail: procopio@cpatc.embrapa.br

Fábio Ribeiro Pires

Professor da Universidade Federal do Espírito Santo,
Centro Universitário Norte do Espírito Santo.
Rua Humberto de Almeida Franklin
Universitário
29933-480 - Sao Mateus, ES - Brasil
Telefone: (27) 37636284 Ramal: 233
E-mail: fabiopires@ceunes.ufes.br

José Barbosa dos Santos

Professor da Universidade Federal dos Vales do
Jequitinhonha e Mucuri, Centro de Ciências Agrárias.
Campus JK - Rodovia MGT 367 Km 583, nº 5000
Alto da Jacuba
39100-000 - Diamantina, MG - Brasil
Telefone: (38) 35321200 Ramal: 1218

Antonio Alberto da Silva

Professor da Universidade Federal de Viçosa, Centro de
Ciências Agrárias, Departamento de Fitotecnia.
Universidade Federal de Viçosa
Universitário
36571-000 - Vicosa, MG - Brasil
Telefone: (31) 38992617 Fax: (31) 38992611

Sumário

Fitorremediação de solos com resíduos de herbicidas....	05
Introdução.....	05
Remediação, biorremediação e fitorremediação: definições e histórico.....	06
Mecanismos biológicos de fitorremediação.....	08
Potencialidades e limitações da fitorremediação.....	10
Seleção de espécies vegetais com potencial de uso na remediação de solos contaminados com herbicida.....	11
A fitorremediação de solos contaminados com herbicidas no Brasil.....	13
Cenários futuros da fitorremediação de solos contaminados com herbicidas.....	26
Referências.....	27

Fitorremediação de solos com resíduos de herbicidas

Sergio de Oliveira Procópio

Fábio Ribeiro Pires

José Barbosa dos Santos

Antonio Alberto da Silva

Introdução

Os herbicidas representam a classe mais comercializada entre os agrotóxicos disponíveis no mundo. No Brasil as vendas com herbicidas representam, aproximadamente, 45% de todo mercado de defensivos agrícolas (SINDAG, 2008). Uma parte dos herbicidas registrados para uso na agricultura, apresenta “atividade residual no solo”. Esse comportamento é importante para uso em situações onde o Período Total de Prevenção da Interferência (PTPI) das plantas daninhas sobre as culturas é longo. Como exemplo, tem-se plantio de culturas que apresentam crescimento inicial lento; sistemas que apresentem maiores distâncias entre as linhas de cultivo; culturas semi-perenes ou perenes; e viveiros de mudas. Nessas situações, a utilização de herbicidas sem atividade residual no solo, ou seja, que controlam apenas as plantas daninhas já emergidas, resultaria na necessidade de repetidas aplicações para manter a cultura livre da interferência das plantas daninhas em todo período necessário. Isso pode resultar em aumento de custos, maior necessidade de equipamentos de aplicação, aumento dos danos mecânicos às culturas e compactação do solo. Contudo, após o término do PTPI, que muitas vezes coincide com o fechamento do dossel do cultivo agrícola, principalmente para as culturas anuais, a presença do herbicida no solo passa a ser indesejável, podendo resultar em *carryover* (BELO et al., 2007), contaminação de mananciais de água subterrânea pela lixiviação e/ou superficiais via runoff (BARRA, et al., 1999; PALMA et al., 2004; KRUTZ et al., 2005), toxicidade a organismos não-alvo (ROUSSEAU et al., 2003), podendo até, dependendo da recalcitrância do composto, acumular-se na cadeia alimentar (EDWARDS, 1973).

A preocupação em impedir ou remediar os efeitos negativos da presença de herbicidas nos diversos compartimentos ambientais vem aumentando ao longo dos anos e se alinha com a nova visão de produção, onde o aumento na produtividade não é mais a única meta, mas também manter o nível produtivo ao longo dos anos, com enfoque preservacionista. A sustentabilidade passou a ser umas das palavras mais importantes para designar a modificação do enfoque dos sistemas agrícolas brasileiros. “Manejo Integrado de Pragas, Doenças e Plantas Daninhas”, “Manejo Ecológico de Pragas, Doenças e Plantas Daninhas”, “Agricultura Orgânica”, “Agricultura Alternativa”, “Produção Integrada de Frutas”, “Aproveitamento de Resíduos Orgânicos”, “Racionalização no Uso de Insumos Agrícolas”, são expressões cada vez mais presentes nos projetos de pesquisa e nas diretrizes dos programas de extensão rural das instituições responsáveis pelo desenvolvimento, agora “sustentável” do agronegócio do País. É decorrente desse contexto, que o desenvolvimento de técnicas de remediação de áreas contaminadas com diversos tipos de poluentes vem se desenvolvendo em vários países do mundo, inclusive no Brasil.

1. Remediação, biorremediação e fitorremediação: definições e histórico

A remediação de uma área contaminada consiste na aplicação de diferentes medidas de contenção e tratamento do material contaminado para o saneamento da área. Ela pode ser química (quelatos, reagentes), física (retirada da camada contaminada; injeção de ar) ou biológica (microrganismos e plantas). O termo remediação tem sido associado normalmente a técnicas não biológicas que promovem a remoção ou atenuação do contaminante.

Na última década, tem-se dado preferência ao emprego de técnicas de remediação *in situ* de solos contaminados em detrimento das técnicas *ex situ*, que envolvem riscos ambientais tais como escavação, manipulação, transporte e armazenamento de materiais contaminados. Entre as mais difundidas técnicas de remediação *in situ* estão a oxidação catalítica ou ventilação do solo, onde é feita injeção de ar dentro do solo ou aquífero contaminado para que os contaminantes voláteis passem à fase gasosa e sejam extraídos por bombeamento; também a oxidação química ou extração por solvente, que atua em solos contaminados por transferência de elétrons entre reagentes. Além dessas, existe ainda o tratamento térmico indireto, a lavagem do solo, a solidificação/estabilização e a incineração, utilizada principalmente na remediação de metais pesados. Apesar da alta eficiência que apresentam, essas técnicas são de custo elevado (SCHNOOR,

1997) e algumas, de difícil execução, sendo, praticamente inviáveis para a aplicação em áreas extensas. Por essas razões, o emprego de alternativas biológicas para despoluição, menos dispendiosas e ambientalmente aceitas, é hoje uma das principais vertentes da pesquisa ambiental.

A biorremediação consiste no emprego de organismos vivos (microrganismos e plantas, principalmente) capazes de se desenvolverem em meio contendo o material poluente, para remediação, normalmente in situ, de áreas contaminadas, reduzindo-o ou até mesmo eliminando seus poluentes (SANTOS et al., 2007a).

Normalmente, o termo biorremediação é utilizado para denominar a descontaminação desempenhada por microrganismos (ANDERSON et al., 2003), os quais, no processo de biorremediação in situ dito “tradicional”, particularmente as bactérias, são estimuladas a degradar os contaminantes seja por utilização da molécula como fonte de nutrientes ou por co-metabolismo. As condições necessárias para essa degradação incluem a existência de receptores de elétrons, de nutrientes e de substrato, incluindo compostos químicos aplicados para as diferentes atividades agrícolas (SANTOS et al., 2007b).

Quando são utilizadas plantas como agentes despoluidores, dá-se o nome de fitorremediação (CUNNINGHAM et al., 1996). Essa técnica consiste no uso de plantas e sua comunidade microbiana associada para degradar, seqüestrar ou imobilizar poluentes presentes no solo (SILICIANO; GERMIDA, 1999). Ainda, de acordo com Accioly e Siqueira (2000), pode envolver, também, o emprego de amenizantes (corretivos, fertilizantes, matéria orgânica etc.) no solo, além de práticas agrônômicas que, se aplicadas em conjunto, removem, imobilizam ou tornam os contaminantes menos tóxicos ao ecossistema.

A fitorremediação não é recente. O que é novo é a investigação sistemática, científica, de como podem ser usadas plantas para descontaminar solo e água. Entre outros, relatos descrevem que na Alemanha, há mais de 300 anos, plantas já eram utilizadas no tratamento de esgotos (CUNNINGHAM et al., 1996). Todavia, o uso do termo phytoremediation (phyto = vegetal + remediation = remediação) é muito mais recente, tendo sido estabelecido em 1991 para definir o uso de vegetais e dos microrganismos a eles associados, como instrumento para contenção, isolamento, remoção ou redução das concentrações de contaminantes em meio sólido, líquido ou gasoso (US EPA, 2000). Para inúmeras fontes de pesquisa, o termo fitorremediação foi cunhado pelo Dr. Ilya

Raskin, professor de biologia vegetal da Rutgers University, EUA, em 1989 (BLACK, 1995). Mas, o que também é atual são as inúmeras aplicações e o crescente interesse de pesquisadores de diversas áreas.

Desde a década de 90 diversas pesquisas tiveram como foco a fitorremediação, notadamente nos EUA e Europa, onde existem inúmeros grupos de pesquisa que se dedicam exclusivamente ao estudo e divulgação da remediação por plantas e até algumas companhias que a exploram com fins lucrativos (SANTOS et al., 2007b).

No Brasil, o termo fitorremediação ainda parece desconhecido para grande parte da comunidade científica. Entretanto, significativo tem sido o avanço nas pesquisas que utilizam plantas e microrganismos a elas associados para despoluição de ecossistemas. Isso é corroborado pelo número de instituições, pesquisadores, teses e referências em geral sobre a fitorremediação em português, encontrados em sites de busca na internet. O número ainda pequeno, porém crescente, de trabalhos publicados nos últimos anos reflete igualmente o número elevado de projetos em execução. Provavelmente, os primeiros artigos oriundos do estudo da fitorremediação no Brasil foram os de Courseuil e outros (2001) e Moreno e Courseuil (2001), investigando o potencial do chorão (*Salix babylonica*), na fitorremediação de aquíferos contaminados por gasolina.

Tendo em vista as condições climáticas mais favoráveis e a biodiversidade existente, comparativamente às regiões de clima temperado, o Brasil apresenta grande potencial de uso dessa tecnologia. O País conta também com a flora mais diversificada do mundo, com número superior a 55 mil espécies descritas, o que corresponde a 22% do total mundial (BRASIL, 2002). Além disso, embora não se tenha idéia dos investimentos globais com despoluição no País, pode-se dizer que os investimentos tendem a crescer, assim como se tem observado quanto ao apoio de Agências de Fomento, em decorrência das exigências de uma sociedade mais esclarecida e à medida que leis mais rígidas são aplicadas dentro e fora do País.

2. Mecanismos biológicos de fitorremediação

Didaticamente a fitorremediação pode ser dividida em oito processos denominados de Fitoextração, Fitoacumulação, Fitodegradação, Fitovolatilização, Fitoestimulação, Rizodegradação, Rizovolatilização e Rizoestabilização, os quais

ocorrem em função das características morfofisiológicas de cada espécie vegetal (Tabela 1). Esses processos não são exclusivos e podem ocorrer simultaneamente ou sequencialmente.

Tabela 1. Mecanismos biológicos de fitorremediação.

<i>MECANISMO</i>	<i>DESCRIÇÃO DO PROCESSO</i>
Fitoextração	Absorção do contaminante presente no ambiente pela espécie vegetal
Fitoacumulação	Armazenamento do contaminante nas raízes ou em outros órgãos, sem modificação nas moléculas do xenobiótico (aprisionamento). Ocorre após a fitoextração
Fitodegradação	Bioconversão do contaminante em formas menos tóxicas ou não-tóxicas nas raízes ou em outros órgãos dos vegetais; em alguns casos a transformação ocorre de forma intensa, resultando na mineralização do xenobiótico. Ocorre após a fitoextração, ou mesmo após a fitoacumulação
Fitovolatilização	Volatilização de um contaminante fitotransformado a uma forma volátil, a qual é liberada na atmosfera. Ocorre após a fitoextração, ou mesmo após a fitoacumulação
Fitoestimulação	Estimulação à concentração/ativação de comunidade microbiana apta a biodegradar o contaminante, resultado da produção e liberação de exsudatos radiculares pela espécie vegetal
Rizodegradação	Biodegradação do contaminante pela comunidade microbiana associada à rizosfera da espécie vegetal. Normalmente ocorre após a fitoestimulação
Rizovolatilização	Volatilização de um contaminante rizotransformado a uma forma volátil, a qual é liberada na atmosfera
Rizoestabilização	Imobilização, lignificação ou humificação do contaminante na rizosfera da espécie vegetal, ficando o contaminante inativo no solo, mesmo que preservando sua integridade molecular

3. Potencialidades e limitações da fitorremediação

Potencialidades

A fitorremediação apresenta elevado potencial de utilização, devido às vantagens que apresenta em relação às outras técnicas de remediação de contaminantes do solo. Essas vantagens se tornam ainda mais evidentes em ambientes agrícolas, onde predominam extensas áreas, que podem estar contaminadas com diferentes tipos de pesticidas. Na Tabela 2 são listadas as principais potencialidades para a implantação de programas de fitorremediação..

Tabela 2. Principais potencialidades na utilização da fitorremediação.

1. Menor custo em relação às técnicas de remediação tradicionalmente utilizadas envolvendo a remoção do solo para tratamento *ex situ*.
2. Os xenobióticos podem ser degradados a compostos não tóxicos internamente nas plantas ou no ambiente rizosférico, podendo ser até mesmo mineralizados a compostos primários. Na ocorrência de tal situação, não há necessidade de remoção das plantas cultivadas na área contaminada.
3. As propriedades biológicas, físicas e químicas do solo são mantidas e, não raro, até melhoradas com o cultivo de espécies vegetais fitorremediadoras.
4. Incorporação de matéria orgânica ao solo, principalmente, quando não há necessidade de retirada das plantas remediadoras da área contaminada.
5. Fixação de nitrogênio atmosférico, principalmente, no caso da utilização de leguminosas como espécies remediadoras.
6. Auxílio no controle do processo erosivo, eólico e hídrico. Nesse último caso, diminuem o carreamento de contaminantes com a água e com o solo e, por conseguinte, reduzindo a possibilidade de contaminação dos cursos hídricos.
7. Redução da lixiviação de contaminantes no solo, reduzindo a contaminação do lençol freático.
8. O emprego de plantas é mais favorável esteticamente do que qualquer outra técnica de remediação, e pode ser implementado com mínimo distúrbio ambiental, evitando escavações e tráfego pesado de maquinário.
9. Utiliza energia solar para realizar os processos de descontaminação.
10. Apresenta alto índice de aceitação pública, perante a sociedade.

Limitações

Apesar de todas as potencialidades comprovadamente significativas, a fitorremediação apresenta algumas limitações e dificuldades que devem ser previstas antes de se optar pelo seu uso. As principais limitações são descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Principais limitações em programas de fitorremediação.

1. Dificuldade na seleção de plantas para fitorremediação, principalmente em relação à descontaminação de solos com resíduos de herbicidas de amplo espectro de ação.
2. O tempo requerido para obtenção de uma despoluição satisfatória pode ser longo, podendo ser requerido mais de um ciclo de cultivo.
3. O contaminante deve estar dentro da zona de alcance do sistema radicular das plantas fitorremediadoras.
4. Clima e condições edáficas podem restringir o crescimento de plantas fitorremediadoras, prejudicando conseqüentemente, a descontaminação do solo.
5. Necessidade de retirada das plantas da área contaminada, quando o composto tóxico é apenas fitoacumulado ou fitodegradado a um composto ainda tóxico.
6. Os xenobióticos podem ser fitotransformados ou mesmo rizotransformados a metabólitos mais problemáticos que o composto inicial.
7. A presença do contaminante ou de algum metabólito tóxico na parte aérea das plantas pode favorecer a contaminação da cadeia alimentar.
8. Dificuldade de controle posterior da planta fitorremediadora.

4. Seleção de espécies vegetais com potencial de uso na remediação de solos contaminados com herbicidas

Uma das primeiras etapas para se iniciar um programa de fitorremediação é a seleção da(s) espécie(s) fitorremediadora(s). Para isso é necessário conhecer com profundidade as características físicas e químicas do contaminante, as características do solo a ser remediado, a topografia da área e as condições climáticas locais.

A seleção de espécies vegetais para remediação de compostos herbicidas tem limitações mais complexas comparativamente a programas que visam à descontaminação de metais pesados, pois herbicidas são contaminantes que apresentam diversidade molecular e maior complexidade de análise, diante das constantes transformações a que estão sujeitos (PIRES et al., 2003b). Além disso, o contaminante, no caso o herbicida, é desenvolvido como agente para o controle do descontaminante, no caso, as plantas (SANTOS et al., 2006a). Por isso, a seleção de plantas para remediação de herbicidas exige, normalmente, que seja avaliado inicialmente um número elevado de espécies, como verificado nos trabalhos desenvolvidos por Procópio e outros (2004) e Santos e outros (2004a), para seletividade ao trifloxysulfuron-sodium e por Pires e outros (2003a) e Pires e outros (2003c), selecionando plantas para remediação de tebuthiuron.

Na Tabela 4 estão apresentados critérios para a escolha da(s) espécie(s) vegetal(is) a ser(em) avaliada(s) como potencial(is) fitorremediadora(s).

Tabela 4. Indicações para seleção de espécies vegetais para programas de fitorremediação.

1. Sistema radicular profundo e denso.
2. Alta taxa de crescimento e produção de biomassa.
3. Capacidade transpiratória elevada, especialmente em árvores e plantas perenes.
4. Elevada taxa de exsudação radicular.
5. Resistência a pragas e doenças.
6. Adaptabilidade ao local a ser remediado (clima e solo).
7. Fixação biológica de nitrogênio atmosférico.
8. Alta associação com fungos micorrízicos.
9. Fácil controle ou erradicação posterior.
10. Quando necessária, facilidade de remoção das plantas da área contaminada.
11. Fácil aquisição ou multiplicação de propágulos.
12. Ocorrência natural em áreas contaminadas.

O ideal seria reunir todas essas características em uma só espécie vegetal, porém, aquela que for selecionada deve reunir o maior número delas. Outro aspecto a ser observado é que, embora a maioria dos testes avalie plantas isoladas, várias espécies podem, como sugerido por Miller (1996), ser usadas em um mesmo local, ao mesmo tempo ou subsequentemente, para promoverem maior descontaminação.

5. A fitorremediação de solos contaminados com herbicidas no Brasil

5.1. Fitorremediação de solos contaminados com o herbicida tebuthiuron

O primeiro herbicida a ser estudado em um programa sistemático de fitorremediação no Brasil foi o tebuthiuron (PIRES et al., 2003b; PIRES et al., 2005a; PIRES et al., 2005b; PIRES et al., 2006). O herbicida tebuthiuron N-{5-(1,1-dimetiletil)-1,3,4-tiadiazol-2-il}-n,n'-dimetiluréia é largamente empregado na cultura da cana-de-açúcar, sendo recomendado para uso em pré-emergência. Estudos mostram que sua persistência no solo pode variar de 11-14 meses (BLANCO; OLIVEIRA, 1987), de 15 a 25 meses (MEYER; BOVEY, 1988) e mesmo de 7,2 anos (EMMERICH et al., 1984), podendo intoxicar culturas sensíveis cultivadas em sucessão à cana-de-açúcar. Além disso, apresenta alta solubilidade em água (2.500 mg L⁻¹ a 25 °C) e elevada mobilidade em solos com baixos teores de argila e carbono orgânico, representando, portanto, fonte potencial de contaminação dos aquíferos, principalmente como resultado de aplicações seqüenciais ao longo dos anos, na mesma área (CERDEIRA et al., 1999). Diante disso, é desejável o emprego de técnicas que acelerem a retirada deste composto do solo, promovendo sua descontaminação.

Pires e outros (2008), avaliando a fitorremediação de solo contaminado com diferentes níveis de tebuthiuron, utilizando *Crotalaria juncea* como espécie indicadora da presença desse herbicida (Figuras 1 e 2), verificaram que as espécies feijão-de-porco e feijão-guandu apresentaram os melhores desempenhos, sendo indicadas para fitorremediação de solos que receberam até 1,0 kg ha⁻¹ de tebuthiuron. Milheto e mucuna-preta apresentaram desempenho intermediário, sendo indicadas para fitorremediação de solos contaminados com baixos níveis de tebuthiuron (máximo 0,5 kg ha⁻¹).

Em outro trabalho, agora utilizando plantas de soja como indicadoras dos resíduos de tebuthiuron no solo, Pires e outros (2006) constataram que feijão-de-porco, seguido de tremoço-branco e mucuna-preta apresentaram melhor desempenho na fitorremediação deste xenobiótico (Tabelas 5 e 6).

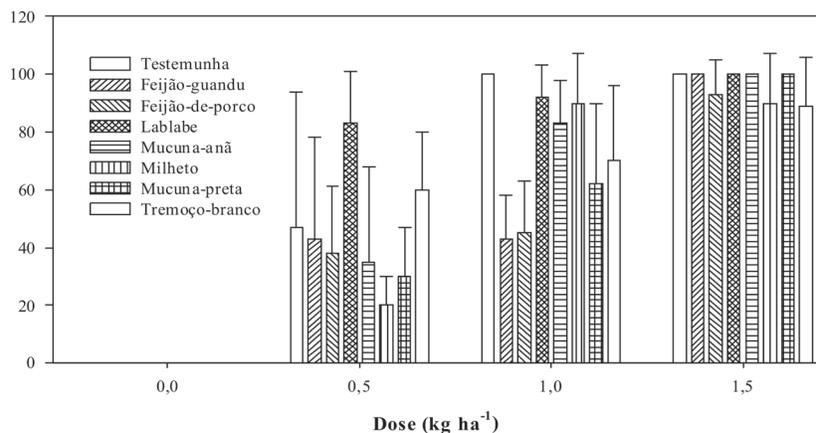


Figura 1. Histograma de valores médios e desvio padrão de fitotoxicidade em plantas de *Crotalaria juncea* semeada em sucessão a sete espécies fitorremediadoras mais uma testemunha sem planta, em Argissolo Vermelho-Amarelo tratado com quatro doses de tebuthiuron. Fonte: Pires e outros (2008).

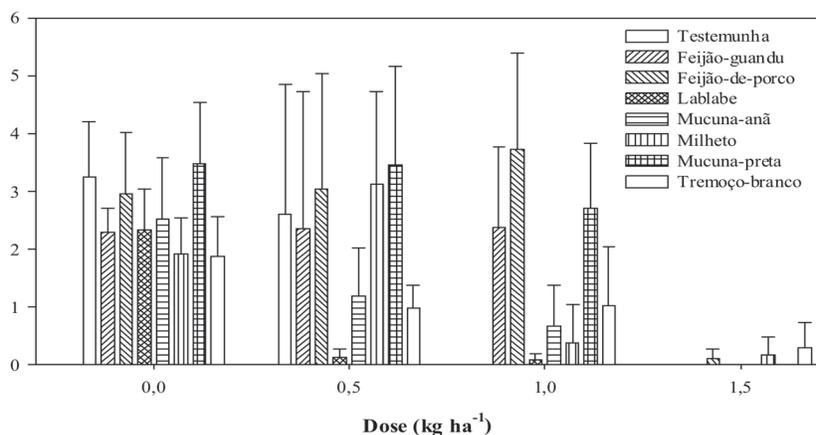


Figura 2. Histograma de valores médios e desvio padrão da biomassa seca da parte aérea de plantas de *Crotalaria juncea* semeada em sucessão a sete espécies fitorremediadoras mais uma testemunha sem planta, em Argissolo Vermelho-Amarelo tratado com quatro doses de tebuthiuron. Fonte: Pires e outros (2008).

Tabela 5. Valores médios e desvio padrão da altura e biomassa seca da parte aérea de plantas de soja semeadas em sucessão a sete espécies fitorremediadoras, em solo tratado previamente com quatro doses de tebuthiuron.

<i>Espécie</i>	<i>Dose</i> <i>kg ha⁻¹</i>			
	<i>0,0</i>	<i>0,5</i>	<i>1,0</i>	<i>1,5</i>
	Altura cm			
Testemunha	20,83 + 3	14,06 + 1	0,00 + 0	0,00 + 0
Feijão-guandu	13,84 + 1	15,06 + 3	0,00 + 0	0,00 + 0
Feijão-de-porco	13,83 + 3	16,85 + 4	14,00 + 3	5,83 + 10
Lablabe	13,25 + 1	20,56 + 3	12,83 + 11	0,00 + 0
Mucuna-anã	14,56 + 3	13,33 + 12	11,50 + 10	0,00 + 0
Milheto	16,94 + 1	17,00 + 4	4,00 + 7	0,00 + 0
Mucuna-preta	16,33 + 2	18,55 + 1	12,67 + 11	0,00 + 0
Tremoço-branco	14,75 + 3	18,05 + 1	12,67 + 11	5,00 + 9
	Biomassa seca da parte aérea g			
Testemunha	1,39 + 0,09	0,69 + 0,96	0,00 + 0	0,00 + 0
Feijão-guandu	1,11 + 0,38	0,58 + 0,23	0,00 + 0	0,00 + 0
Feijão-de-porco	0,91 + 0,15	0,61 + 0,33	0,63 + 0,78	0,12 + 0,2
Lablabe	0,69 + 0,16	0,72 + 0,19	0,25 + 0,24	0,00 + 0
Mucuna-anã	1,16 + 0,36	1,01 + 0,88	0,08 + 0,07	0,00 + 0
Milheto	0,88 + 0,24	0,93 + 0,11	0,02 + 0,03	0,00 + 0
Mucuna-preta	0,67 + 0,24	0,68 + 0,15	0,28 + 0,25	0,00 + 0
Tremoço-branco	1,03 + 0,16	1,11 + 0,46	0,50 + 0,45	0,29 + 0,35

Fonte: Pires e outros (2006).

Tabela 6. Valores médios e desvio padrão de sintomas de fitotoxicidade e área foliar de plantas de soja semeadas em sucessão a sete espécies fitorremediadoras em solo tratado previamente com quatro doses de tebuthiuron.

<i>Espécie</i>	<i>Dose</i>			
	<i>0,0</i>	<i>0,5</i>	<i>1,0</i>	<i>1,5</i>
	Fitotoxicidade			
	----- % -----			
Testemunha	0 + 0	43 + 5	100 + 0	100 + 0
Feijão-guandu	0 + 0	38 + 15	100 + 0	100 + 0
Feijão-de-porco	0 + 0	60 + 10	61 + 19	90 + 17
Lablabe	0 + 0	43 + 12	87 + 13	100 + 0
Mucuna-anã	0 + 0	43 + 49	93 + 6	100 + 0
Milheto	0 + 0	20 + 0	99 + 1	100 + 0
Mucuna-preta	0 + 0	33 + 14	72 + 25	100 + 0
Tremoço-branco	0 + 0	23 + 15	75 + 25	93 + 12
	Area Foliar			
	----- cm ² -----			
Testemunha	139,60 + 21	83,21 + 17	0,00 + 0	0,00 + 0
Feijão-guandu	125,75 + 28	68,63 + 29	0,00 + 0	0,00 + 0
Feijão-de-porco	116,09 + 24	73,04 + 35	53,75 + 4	18,17 + 31
Lablabe	74,63 + 22	95,65 + 14	35,64 + 35	0,00 + 0
Mucuna-anã	95,49 + 39	98,63 + 86	3,23 + 2,9	0,00 + 0
Milheto	101,21 + 23	123,82 + 23	0,24 + 04	0,00 + 0
Mucuna-preta	56,12 + 12	84,68 + 21	23,79 + 22	0,00 + 0
Tremoço-branco	91,67 + 8	167,73 + 42	72,39 + 65	11,00 + 0

Fonte: Pires et al. (2006).

5.2. Fitorremediação de solos contaminados com o herbicida trifloxysulfuron sodium

O herbicida trifloxysulfuron sodium pertence ao grupo químico das sulfoniluréias, atuando na inibição da enzima acetolactato sintase (ALS). Esse herbicida vem sendo amplamente utilizado na cultura do algodão em pós-emergência inicial, porém pode apresentar problemas de *carryover* em culturas suscetíveis cultivadas em sucessão. Mesmo sendo um produto utilizado em baixas concentrações (em torno de $7,5 \text{ g ha}^{-1}$), o período de espera para o plantio de culturas sensíveis, recomendado pelo fabricante, é de, aproximadamente, oito meses a contar de sua aplicação. Esse fato pode limitar sua utilização em áreas onde o agricultor cultiva, por exemplo, feijão no inverno.

Santos e outros (2004b) e Procópio e outros (2005b) constataram, respectivamente, que a biomassa seca da parte aérea de plantas feijão e a altura de plantas de milho não foram prejudicadas pela ação do herbicida trifloxysulfuron sodium quando se cultivou, previamente, as espécies *Canavalia ensiformis* e *Mucuna aterrima*, concluindo que essas espécies foram eficientes na fitorremediação do herbicida trifloxysulfuron sodium no solo estudado (Tabelas 7 e 8).

Tabela 7. Efeito do plantio anterior de diversas espécies vegetais sobre a biomassa seca da parte aérea (BSPA) de plantas de feijão aos 45 dias após a emergência, semeadas em solo submetido a três doses do herbicida trifloxysulfuron sodium (D).

Espécie fitorremediadora	Doses de trifloxysulfuron sodium (g ha^{-1})		
	0,00	3,75	15,00
	BSPA de plantas de feijão (g)		
Sem cultivo	12,51 a	3,71 d	2,72 c
M. sativa	6,15 c	5,77 c	5,39 b
C. muconoides	8,54 b	5,29 c	2,52 c
C. juncea	6,95 c	4,83 c	3,53 c
C. spectabilis	4,93 d	4,60 d	3,47 c
V. sativa	7,93 c	7,29 b	6,48 b
C. cajan	5,21 d	3,65 d	1,74 c
C. ensiformis	10,82 a	10,15 a	9,45 a
D. lablab	6,76 c	6,02 c	5,66 b
P. glaucum	5,99 c	3,86 d	2,70 c
S. guianensis	6,74 c	4,51 d	3,77 c
M. deeringiana	3,19 d	3,40 d	2,66 c
M. cinereum	4,13 d	4,04 d	2,30 c
M. aterrima	11,08 a	11,20 a	9,18 a
R. sativus	5,84 c	4,35 d	3,17 c
L. albus	4,56 d	3,11 d	1,95 c

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo critério de Scott-Knott ($P > 0,05$).

Fonte: Santos e outros (2004b).

Tabela 8. Efeito do plantio anterior de diversas espécies vegetais sobre a altura de plantas de milho aos 45 dias após a emergência, semeadas em solo submetido a três doses do herbicida trifloxysulfuron sodium (D).

<i>Espécie fitorremediadora</i>	<i>Altura de plantas de milho (cm)</i>		
	<i>0,00</i>	<i>3,75</i>	<i>15,00</i>
Sem cultivo	67,33 a	36,67 c	30,00 c
M. sativa	34,67 c	22,00 d	21,67 d
C. muconoides	53,00 b	45,00 b	33,33 c
C. juncea	54,33 b	49,00 b	42,67 b
C. spectabilis	54,50 b	54,00 a	28,67 c
V. sativa	52,67 b	52,67 a	38,33 b
C. cajan	52,00 b	44,67 b	34,00 c
C. ensiformis	54,00 b	54,00 a	51,00 a
D. lablab	47,00 b	41,33 b	35,33 c
P. glaucum	36,00 c	25,00 d	22,33 d
S. guianensis	55,00 b	31,00 c	28,00 c
M. deeringiana	55,67 b	48,33 b	46,33 a
M. cinereum	55,50 b	48,33 b	46,50 a
M. aterrima	60,00 a	53,33 a	53,00 a
R. sativus	35,00 c	30,67 c	30,33 c
L. albus	57,17 b	51,00 a	39,33 b

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo critério de Scott-Knott ($P > 0,05$).
Fonte: Procópio e outros (2005b).

A implementação da fitorremediação, técnica de descontaminação prévia de áreas que apresentam resíduos do herbicida trifloxysulfuron sodium, utilizando as espécies mucuna-preta e feijão-de-porco, pode permitir a antecipação do cultivo de feijão nessas localidades em até seis meses. Ressalta-se ainda que essas espécies são importantes adubos verdes, podendo seu cultivo promover, além da descontaminação, outros benefícios em relação à fertilidade e à conservação do solo. Em trabalho a campo Procópio e outros (2007) observaram que para todos os níveis de contaminação do solo com o trifloxysulfuron sodium, a fitorremediação promovida pelas leguminosas mucuna-preta e feijão-de-porco resultou sempre em maior produtividade da cultura do feijão em relação aos tratamentos sem cultivo anterior (Tabela 9 e Tabela 10, contraste X1). Também, concluíram que a permanência da palhada, tanto da mucuna-preta como do feijão-de-porco, não prejudicou na produtividade da cultura, mesmo sendo uma sucessão que envolve espécies pertencentes à mesma família botânica (Fabaceae). Essa constatação consiste numa informação relevante para sistemas que preconizam a manutenção da cobertura do solo por resíduos de plantas.

Tabela 9. Altura e biomassa seca da parte aérea (BSPA) de plantas de feijão (*Phaseolus vulgaris* cv. Vermelho Coimbra) aos 45 dias após a semeadura (DAS) e produtividade de grãos, em área contaminada com diferentes níveis do herbicida trifloxysulfuron sodium (0,00; 3,75; 7,50 e 15,00 g ha⁻¹), com ou sem o cultivo prévio de duas espécies de adubos verdes.

<i>Tipos de cultivo prévio à semeadura do feijão</i>	<i>Altura de plantas (cm)</i>	<i>BSPA (g planta⁻¹)</i>	<i>Produtividade (kg ha⁻¹)</i>
Sem herbicida			
Mucuna-preta com palha mantida na área	62,48	10,19	2141
Mucuna-preta sem palha mantida na área	70,50	12,30	2086
Feijão-de-porco com palha mantida na área	72,78	14,48	2249
Feijão-de-porco sem palha mantida na área	70,68	11,30	1943
Sem cultivo prévio com área capinada	61,91	11,88	2311
3,75 g ha¹			
Mucuna-preta com palha mantida na área	61,65	12,43	1923
Mucuna-preta sem palha mantida na área	56,10	10,23	1853
Feijão-de-porco com palha mantida na área	67,60	12,50	2388
Feijão-de-porco sem palha mantida na área	64,53	11,18	1898
Sem cultivo prévio com área capinada	32,28	7,15	1761
7,50 g ha¹			
Mucuna-preta com palha mantida na área	68,65	13,53	1994
Mucuna-preta sem palha mantida na área	62,68	9,43	1823
Feijão-de-porco com palha mantida na área	60,05	11,93	2212
Feijão-de-porco sem palha mantida na área	68,90	10,40	1924
Sem cultivo prévio com área capinada	31,35	6,15	1687
1,50 g ha¹			
Mucuna-preta com palha mantida na área	71,03	11,40	2057
Mucuna-preta sem palha mantida na área	50,50	9,68	1821
Feijão-de-porco com palha mantida na área	58,75	11,43	1974
Feijão-de-porco sem palha mantida na área	52,18	10,73	1800
Sem cultivo prévio com área capinada	30,50	5,78	1630
Média	58,75	10,70	1974
C.V. (%)	17,10	16,47	11,53

Fonte: Procópio e outros (2007).

Tabela 10. Estimativa dos contrastes ortogonais em relação às variáveis altura de plantas, biomassa seca da parte aérea e produtividade de grãos de feijão, em área contaminada com diferentes níveis do herbicida trifloxysulfuron sodium, com ou sem o cultivo prévio de duas espécies de adubos verdes.

<i>Contraste (Xi)</i>	<i>Estimativa do contraste</i>			
	<i>0,00 g ha⁻¹</i>	<i>3,75 g ha⁻¹</i>	<i>7,50 g ha⁻¹</i>	<i>15,0 g ha⁻¹</i>
	<i>Altura de plantas (cm)</i>			
X1 = MPCP + MPSP + FPCP + FPSP – 4TEST	28,8 ^{ns}	120,76 ^{**}	134,88 ^{**}	110,46 ^{**}
X2 = MPCP + MPSP - FPCP - FPSP	-10,48 ^{ns}	-14,38 ^{ns}	2,38 ^{ns}	10,6 ^{ns}
X3 = MPCP - MPSP	-8,02 ^{ns}	5,55 ^{ns}	5,97 ^{ns}	20,53 ^{**}
X4 = FPCP - FPSP	2,1 ^{ns}	3,07 ^{ns}	-8,85 ^{ns}	6,57 ^{ns}
	Biomassa seca da parte aérea (g planta⁻¹)			
X1 = MPCP + MPSP + FPCP + FPSP – 4TEST	0,75 ^{ns}	17,74 ^{**}	20,69 ^{**}	20,12 ^{**}
X2 = MPCP + MPSP - FPCP - FPSP	-3,29 ^{ns}	-1,02 ^{ns}	0,63 ^{ns}	-1,08 ^{ns}
X3 = MPCP - MPSP	-2,1 ^{ns}	2,2 ^{ns}	4,1 ^{**}	1,72 ^{ns}
X4 = FPCP - FPSP	3,18 [*]	1,32 ^{ns}	1,53 ^{ns}	0,7 ^{ns}
	Produtividade de grãos (kg ha⁻¹)			
X1 = MPCP + MPSP + FPCP + FPSP – 4TEST	-825 ^{ns}	1018 [*]	1205 [*]	1132 [*]
X2 = MPCP + MPSP - FPCP - FPSP	35 ^{ns}	-510 [*]	-319 ^{ns}	104 ^{ns}
X3 = MPCP - MPSP	55 ^{ns}	70 ^{ns}	171 ^{ns}	236 ^{ns}
X4 = FPCP - FPSP	306 ^{ns}	490 ^{**}	288 ^{ns}	174 ^{ns}

*, ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. ns = Não-significativo.
MPCP = Mucuna-preta com palha mantida na área; MPSP = Mucuna-preta sem palha mantida na área;
FPCP = Feijão-de-porco com palha mantida na área; FPSP = Feijão-de-porco sem palha mantida na área e
TEST = Sem cultivo prévio com área capinada.
Fonte: Procópio e outros (2007).

Santos e outros (2006a) concluíram que o feijão-de-porco é eficiente na fitorremediação do herbicida trifloxysulfuron sodium em solo, em condições de campo, e que a densidade populacional mínima desse adubo verde que proporciona maior rendimento de grãos à cultura do feijão é de 20 plantas m⁻² (Tabela 11). Enquanto que Procópio e outros (2005a) constataram que a densidade populacional da mucuna-preta que proporciona maior rendimento de grãos à cultura do feijão é de 25 plantas por metro quadrado (Tabela 12).

Tabela 11. Altura de plantas e biomassa seca da parte aérea aos 45 dias após a semeadura, peso de 100 sementes, número de vagens por planta e rendimento de grãos de feijão (cultivar Vermelho-Coimbra) semeado após o cultivo prévio de *Canavalia ensiformis*, em diferentes densidades populacionais, em solo contaminado com o herbicida trifloxysulfuron sodium (15 g ha⁻¹).

<i>Densidade (plantas m⁻²)</i>	<i>Altura de plantas (cm)</i>		<i>Biomassa seca da parte aérea (g)</i>	
	<i>Solo com herbicida</i>	<i>Solo sem herbicida</i>	<i>Solo com herbicida</i>	<i>Solo sem herbicida</i>
0	87,40 b	93,32 a	21,25 b	28,85 a
8	98,00 a	94,17 b	23,65 b	28,02 a
20	96,70 a	98,00 a	21,50 b	26,97 a
32	88,17 a	88,90 a	19,31 b	22,72 a
C.V. (%)	3,47		5,49	
	<i>Peso 100 sementes (g)</i>		<i>Vagens planta⁻¹</i>	
	<i>Solo com herbicida</i>	<i>Solo sem herbicida</i>	<i>Solo com herbicida</i>	<i>Solo sem herbicida</i>
0	22,46 a	21,64 a	6,18 b	10,10 a
8	20,99 a	20,96 a	9,54 b	11,50 a
20	22,82 a	22,77 a	11,14 a	10,85 a
32	22,63 a	22,35 a	9,56 a	10,35 a
C.V. (%)	4,21		8,99	
<i>Rendimento de grãos (kg ha⁻¹)</i>				
	<i>Solo com herbicida</i>		<i>Solo sem herbicida</i>	
0	2285,92 b		2408,85 a	
8	2437,11 a		2415,36 a	
20	2548,97 a		2455,73 a	
32	2518,42 a		2506,38 a	
C.V. (%)	6,10			

Médias seguidas por letras iguais na linha para cada característica, não diferem entre si pelo F a 5% de probabilidade.

Fonte: Santos e outros (2006a).

Tabela 12. Altura de plantas e biomassa seca da parte aérea aos 45 dias após a sementeira, peso de 100 sementes, número de vagens por planta e rendimento de grãos de feijão (cultivar Vermelho-Coimbra) semeado após o cultivo prévio de *Mucuna aterrima*, em diferentes densidades populacionais, em solo contaminado ou não com o herbicida trifloxysulfuron sodium (15 g ha⁻¹).

<i>Densidade (plantas m⁻²)</i>	<i>Altura de plantas (cm)</i>		<i>Biomassa seca da parte aérea (g)</i>	
	<i>Solo com herbicida</i>	<i>Solo sem herbicida</i>	<i>Solo com herbicida</i>	<i>Solo sem herbicida</i>
0	85,92 b	101,54 a	20,55 b	28,55 a
10	99,55 a	98,48 a	25,32 a	26,00 a
25	95,35 a	94,15 a	27,65 a	27,92 a
40	88,96 a	93,34 a	23,55 a	27,52 a
C.V. (%)	4,29		5,86	
	<i>Peso 100 sementes (g)</i>		<i>Vagens planta⁻¹</i>	
	<i>Solo com herbicida</i>	<i>Solo sem herbicida</i>	<i>Solo com herbicida</i>	<i>Solo sem herbicida</i>
0	22,35 a	22,05 a	7,14 b	11,85 a
10	21,84 a	22,52 a	8,88 b	12,70 a
25	22,78 a	21,62 a	10,20 a	11,10 a
40	21,35 a	21,71 a	10,05 a	9,13 a
C.V. (%)	2,60		10,15	
	<i>Rendimento de grãos (kg ha⁻¹)</i>			
	<i>Solo com herbicida</i>		<i>Solo sem herbicida</i>	
0	2083,33 b		2773,44 a	
10	2278,91 a		2513,02 a	
25	2725,39 a		2263,02 b	
40	2526,04 a		1849,84 b	
C.V. (%)	11,18			

Médias seguidas por letras iguais na linha para cada característica, não diferem entre si pelo F a 5% de probabilidade.

Fonte: Procópio e outros (2005a).

5.3 Fitorremediação de solos contaminados com o herbicida picloram

Considerando os atuais produtos comercializados para o controle de plantas daninhas, com lenta degradação no solo, recebe destaque o picloram, herbicida pertencente ao grupo dos mimetizadores de auxinas, registrado no Brasil para o controle de dicotiledôneas de porte arbóreo, arbustivo e sub-arbustivo em áreas ocupadas por pastagens, puro ou em mistura ao 2,4-D ou ao fluroxypyr (RODRIGUES; ALMEIDA, 2005). Esse herbicida apresenta meia vida no solo superior a 300 dias, dependendo das condições ambientais, e persistência de até três anos (DEUBERT; CORTE-REAL, 1986). A participação dessa molécula na maioria dos produtos registrados, aliada à baixa tecnologia de aplicação de herbicidas em pastagens, tornam a molécula do picloram ambientalmente perigosa, principalmente em locais com lençol freático superficial ou em áreas onde o agricultor deseja implantar a integração lavoura/pecuária.

Para as técnicas de consorciação entre a agricultura e pecuária, destaca-se a utilização de cultivos em sistemas de sucessão, rotação ou em consórcios de milho, feijão e soja com espécies forrageiras (KICHEL et al., 1998; KLUTHCOUSKI et al., 2003).

A transformação de pastagens em áreas agrícolas tem se tornado prática comum, principalmente na região do Cerrado Brasileiro. No entanto, caso o herbicida picloram tenha sido utilizado na pastagem, visando ao controle de plantas invasoras, normalmente arbustivas ou arbóreas, a área fica impossibilitada de ser cultivada com culturas sensíveis a esse herbicida, como a soja, o tomate, o feijão, o algodão e as cucurbitáceas em geral, por pelo menos três anos. Além da questão da utilização da terra para fins agrícolas, outro ponto preocupante é que esse herbicida ainda apresenta alta solubilidade em água, o que favorece sua movimentação vertical no perfil dos solos, podendo atingir e se distribuir nas águas subterrâneas (SANTOS et al., 2006b).

Procópio e outros (2008) constataram que a espécie *Eleusine coracana* mostrou ter capacidade de remediar solos contaminados com o herbicida picloram (Tabela 13), e que a partir de 172 plantas m⁻², aumentos na densidade populacional da espécie fitorremediadora *E. coracana* não proporcionaram redução de carryover do herbicida picloram sobre a cultura da soja semeada em sucessão. Os autores concluíram que a densidade populacional de 172 plantas m⁻² foi a mais viável. A possibilidade de utilização de *E. coracana*, além do efeito remediador, da facilita-

de de multiplicação (quando for o caso) e do baixo custo de aquisição, é interessante também pela facilidade no controle posterior das plantas dessa espécie, pois se trata de uma espécie anual e com alta sensibilidade ao herbicida glyphosate, sendo, portanto, baixo o risco de se tornar uma espécie daninha.

Em outro trabalho Procópio e outros (2009) verificaram que a espécie *Panicum maximum* cv. Tanzânia influenciou o nível de fitotoxicidade do herbicida picloram sobre a cultura da soja semeada em sucessão e tem capacidade de remediar solos contaminados com esse herbicida (Tabela 14). Segundo os autores, este processo foi influenciado pela densidade populacional da espécie fitorremediadora *P. maximum* cv. Tanzânia, alcançando seu máximo com 122 plantas m⁻² e havendo decréscimo com populações maiores.

Tabela 13. Fitotoxicidade em plantas de soja semeadas após o cultivo prévio de *Eleusine coracana* - capim-pé-de-galinha-gigante, em quatro densidades populacionais, em solo contaminado com três níveis do herbicida picloram.

Doses de picloram (g ha ⁻¹)	Plantas de <i>Eleusine coracana</i> m ²			
	0	172	344	516
Fitotoxicidade (%) em plantas de soja aos 15 DAE*				
0	0,00 b	0,00 b	0,00 b	0,00 b
80	92,25 a	6,00 a	7,25 a	10,25 a
160	94,75 a	7,25 a	11,75 a	10,50 a
Fitotoxicidade (%) em plantas de soja aos 40 DAE				
0	0,00 b	0,00 b	0,00 b	0,00 b
80	99,75 a	49,75 a	56,75 a	57,00 a
160	97,25 a	58,75 a	64,50 a	62,50 a

Médias não seguidas de mesma letra, na vertical, diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

*DAE = dias após a emergência.

Fonte: Procópio e outros (2008).

Tabela 14. Altura de plantas de soja semeadas após o cultivo prévio de *Panicum maximum* (cultivar Tanzânia), em quatro densidades populacionais, em solo contaminado com três níveis do herbicida picloram.

<i>Doses de picloram (g ha⁻¹)</i>	<i>Plantas de Panicum maximum (cultivar Tanzânia) m⁻²</i>			
	<i>0</i>	<i>122</i>	<i>244</i>	<i>366</i>
<i>Altura de plantas de soja (cm) aos 15 DAE*</i>				
0	10,75 a	12,48 a	13,55 a	13,00 a
80	4,55 b	12,73 a	12,50 a	12,03 a
160	2,93 b	13,48 a	12,05 a	10,60 a
<i>Altura de plantas de soja (cm) aos 40 DAE</i>				
0	28,55 a	46,13 a	41,70 a	41,83 a
80	3,38 b	42,23 a	36,30 a	35,05 a
160	3,33 b	45,30 a	40,23 a	21,38 b

Médias não seguidas de mesma letra na vertical diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. *DAE = dias após a emergência.

Fonte: Procópio e outros (2009).

Carmo e outros (2008) afirmam que tanto a soja como o tomate demonstram alta sensibilidade à resíduos do picloram no solo. Isso torna inviável o cultivo dessas culturas em áreas contaminadas com esse herbicida sem a execução de algum procedimento remediador, sob o risco de perda total da área cultivada. De acordo com os autores, o cultivo prévio de Tanzânia por 60 dias, em solos com as características físicas e químicas semelhantes ao utilizado nesse estudo, pode garantir crescimento satisfatório de plantas de soja e tomate em ambiente com resíduos de picloram em torno de 80 g ha⁻¹. Porém, em maiores concentrações do contaminante a fitorremediação realizada pelas plantas de Tanzânia não proporcionou bom crescimento das plantas de soja e tomate, sendo necessária continuidade no processo de descontaminação (Tabela 15).

Tabela 15. Massa seca da parte aérea de plantas de soja semeadas após o cultivo prévio de *Panicum maximum* (cultivar Tanzânia), em quatro períodos de permanência, em solo contaminado com três níveis do herbicida picloram.

Doses de picloram (g ha ⁻¹)	Tempo de cultivo de <i>Panicum maximum</i> (cultivar Tanzânia) (dias)			
	0	60	80	100
Massa seca da parte aérea de plantas de soja (g) aos 40 DAE*				
0	12,70 a	27,88 a	24,45 a	23,85 a
80	7,23 b	25,30 a	21,02 ab	21,33 ab
160	3,18 b	12,77 b	19,13 b	16,57 b

Médias não seguidas de mesma letra na vertical diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. *DAE = dias após a emergência.

Fonte: Carmo e outros (2008).

6. Cenários futuros da fitorremediação de solos contaminados com herbicidas

Novos estudos na área de fitorremediação de solos contaminados com herbicidas estão sendo realizados utilizando técnicas quantitativas de mensurar a redução no nível de resíduos de herbicidas em solos, principalmente por cromatografia. Isso vem complementar as avaliações realizadas com plantas indicadoras da presença de herbicidas (bioensaios).

A fitorremediação de outros herbicidas que apresentam persistência significativa nos solos como sulfentrazone, imazaquin e diclosulan, também começa a ser investigada, inclusive por outros grupos de pesquisa no Brasil, ampliando assim a rede nacional de pesquisa de fitorremediação de xenobióticos.

A inclusão de outros fatores complementares à técnica de fitorremediação começa a ser feita nos experimentos, como adição de matéria orgânica, vinhaça e torta de filtro aos solos contaminados, estratégia que pode acelerar ainda mais o processo de descontaminação das áreas.

O cultivo de duas espécies fitorremediadoras simultaneamente ou em seqüência deve começar a ser avaliada dentro dos programas de fitorremediação, assim

como a inoculação das sementes dessas espécies com microrganismos com capacidade de biorremedição de pesticidas, ou seja, um enriquecimento da rizosfera remediadora.

Por fim, a transformação de plantas começa a ser utilizada como ferramenta de fitorremediação. A identificação de genes responsáveis pela capacidade remediadora de plantas ou mesmo de microrganismos começa a ser investigada. Com esses estudos, a transgenia pode vir a ser utilizada para ampliar a capacidade de plantas na atividade remediadora.

Referências

- 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. (Ed.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 299-352.
- BARRA, R.; NOTARIANNI, V.; MAFFIOLI, G. et al. Patrones de contaminación por herbicidas en aguas superficiales en una cuenca agrícola. **Ecotoxicology and Environmental Restoration**, New York, v. 2, p. 75-83, 1999.
- BELO, A. F.; SANTOS, E. A.; SANTOS, J. B. et al. Fitorremediação de solo adubado com composto orgânico e contaminado com trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 25, p. 251-258, 2007.
- BLACK, H. Absorbing Possibilities: Phytoremediation. **Environmental Health Perspectives**. Washington, USA v. 103, 1995. Disponível em: <http://www.ehponline.org/docs/1995/103-12/innovations.html>. Acessado em 26/04/2007.
- BLANCO, J. G.; OLIVEIRA, D. A. Persistência de herbicidas em Latossolo Vermelho-Amarelo em cultura de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, p. 681-687, 1987.
- BRASIL. **Biodiversidade**: riqueza de espécies. Ministério do Meio Ambiente,

2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biodiversidade/biodiv/brasil.html>>. Acessado em: 26/04/2007.

CARMO, M. L.; PROCOPIO, S. O.; PIRES, F. R. et al. Influência do período de cultivo de *Panicum maximum* (Cultivar Tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com picloram. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 26, p. 315-322, 2008.

CERDEIRA, A. L. Herbicide and nitrate residues in surface and groundwater from sugarcane área in Brazil. **Bollettino Chimico Farmacêutico**, Milano, v. 138, p. 131, 1999.

CORSEUIL, H. X.; MORENO, F. N. Phytoremediation potential of willow trees for aquifers contaminated with ethanol-blended gasoline. **Water Research**, Halliowford, v. 35, p. 3013–3017, 2001.

CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Advances in Agronomy**, New York, v. 56, p. 55-114, 1996.

DEUBERT, K. H.; CORTE-REAL, I. Soil residues of picloram and triclopyr after selective foliar application on utility rights-of-way. **Journal of Arboriculture**, Urbana, v. 12, p. 269-272, 1986.

EDWARDS, C.A. **Persistent pesticides in the environment**. 2. ed. U.S.A.: CRC Press, 1973, 170 p.

EMMERICH, W. E.; HELMER, J. D.; RENARD, K. G. et al. Fate and effectiveness of tebuthiuron applied to a rangeland watershed. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 13, p. 382-386, 1984.

KICHEL, A. N.; MIRANDA, C. H. B.; MACEDO, F. C. L. Uso da cultura do milho para recuperação de pastagens degradadas de *Brachiaria decumbens*. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 35., 1998, Botucatu. **Anais...** Botucatu: SBZ. 1998. p. 40-42.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (Ed.). **Integração lavoura-pecuária**. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. 570 p.

- KRUTZ, L. J.; SENSEMAN, S. A.; ZABLOTOWICZ, R. M. et al. Reducing herbicide runoff from agricultural fields with vegetative filter strips: a review. **Weed Science**, Ithaca, v. 53, p. 353–367, 2005.
- MEYER, R. E.; BOVEY, R. W. Tebuthiuron formulation and placement effects on response of woody plants and soil residue. **Weed Science**, Ithaca, v. 36, p. 373-378, 1988.
- MILLER, R. R. **Phytoremediation**. 1996. Disponível em <http://www.gwrtac.org>. Acessado em 18 jun. 2001.
- MORENO, F. N.; CORSEUIL, H. X. Fitorremediação de aquíferos contaminados por gasolina. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 6, p. 1-7, 2001.
- PALMA, G.; SANCHES, A.; OLAVE, Y. et al. Pesticides levels in surfaces waters in an agricultural-forestry basin in Southern Chile. **Chemosphere**, Ney York, v. 57, p. 763-770, 2004.
- PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; SILVA, A. A. et al. Seleção de plantas tolerantes ao tebuthiuron e com potencial para fitorremediação. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 50, p. 583-594, 2003a.
- PIRES, F. R.; PROCÓPIO, S. O.; SOUZA, C. M. et al. Adubos verdes na fitorremediação de solos contaminados com o herbicida tebuthiuron. **Caatinga**, Mossoró, v. 19, p. 92-97, 2006.
- PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; CECON, P. R. et al. Inferências sobre atividade rizosférica de espécies com potencial para fitorremediação do herbicida tebuthiuron. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 627-634, 2005a.
- PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; SILVA, A. A. et al. Fitorremediação de solos contaminados com tebuthiuron utilizando-se espécies cultivadas para adubação verde. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 23, p. 711-717, 2005b.
- PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; SILVA, A. A. et al. Fitorremediação de solos contaminados por herbicidas. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 21, p. 335-341, 2003b.

PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; SILVA, A. A. et al. Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de tebuthiuron. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 21, p.451-458, 2003c.

PIRES, F. R.; PROCÓPIO, S. O.; SANTOS, J. B. et al. Avaliação da fitorremediação de tebuthiuron utilizando *Crotalaria juncea* como planta indicadora. **Revista Ciências Agrônômicas**, Fortaleza, v. 39, p. 245-250, 2008.

PROCÓPIO, S. O.; SANTOS, J. B.; PIRES, F. R. et al. Fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium por mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*). **Planta Daninha**, Viçosa, v. 23, p. 719-724, 2005a.

PROCÓPIO, S. O.; SANTOS, J. B.; PIRES, F. R. et al. Development of bean plants in soil contaminated with the herbicide trifloxysulfuron-sodium after *Stizolobium aterrimum* and *Canavalia ensiformis* cultivation. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 25, p. 87-96, 2007.

PROCÓPIO, S. O.; SANTOS, J. B.; SILVA, A. A. et al. Potencial de espécies vegetais para a remediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 23, p. 9-16, 2005b.

PROCÓPIO, S. O.; SANTOS, J. B.; SILVA, A. A. et al. Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de solos contaminados com o herbicida trifloxysulfuron sodium. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 22, p. 315-322, 2004.

PROCÓPIO, S.O.; CARMO, M.L.; PIRES, F.R.; CARGNELUTTI FILHO, A.; BRAZ, G.B.P.; SILVA, W.F.P.; BARROSO, A.L.L.; SILVA, G.P.; CARMO, E.L.; BRAZ, A.J.B.P. Fitorremediação de solo contaminado com picloram por capim-pé-de-galinha-gigante (*Eleusine coracana*). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2517-2524, 2008.

PROCÓPIO, S. O.; CARMO, M. L.; PIRES, F. R. et al. Efeito da densidade populacional de *Panicum maximum* (cultivar Tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com o herbicida picloram. **Semina**, Londrina, v. 30, p. 295-304, 2009.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 5. ed. Londrina: Grafmarke, 2005. 591 p.

ROUSSEAU, S.; HARTMANN, A.; ROUARD, N. et al. A simplified procedure for terminal restriction fragment length polymorphism analysis of the soil bacterial community to study the effects of pesticides on the soil microflora using 4,6-dinitroorthocresol as test case. **Biology and Fertility of Soils**, Alemanha Ocidental, v. 37, p. 250-254, 2003.

SANTOS, J. B.; PROCÓPIO, S. O.; SILVA, A. A. et al. Seletividade do herbicida trifloxysulfuron sodium para fins de fitorremediação. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 51, p. 129-141, 2004a.

SANTOS, J. B.; PROCÓPIO, S. O.; SILVA, A. A. et al. Fitorremediação do herbicida trifloxysulfuron sodium. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 22, p. 323-330, 2004b.

SANTOS, J. B.; PROCÓPIO, S. O.; PIRES, F. R. et al. Fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium por diferentes densidades populacionais de feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) dc.). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, p. 444-449, 2006a.

SANTOS, E. A.; SANTOS, J. B.; FERREIRA, L. R. et al. Fitoestimulação por *Stizolobium aterrimum* como processo de remediação de solo contaminado com trifloxysulfuron sodium. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 25, p. 259-265, 2007a.

SANTOS, J. B.; SILVA, A. A.; PROCÓPIO, S. O. et al. Fitorremediação de áreas contaminadas por herbicidas. In: SILVA, A. A.; SILVA, J. F. (Ed.). **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa: UFV, 2007b. p. 249-278.

SANTOS, M. V.; FREITAS, F. C. L.; FERREIRA, F. A. et al. Eficácia e persistência no solo de herbicidas utilizados em pastagem. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 24, p. 391-398, 2006b.

SCHNOOR, J. L.; DEE, P. E. **Technology evaluation report: phytoremediation**. Pittsburgh, PA: Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center. 1997. 37 p. (E Series: GWRTAC TE-98-01)

SILICIANO, S. D.; GERMIDA, J. J. Enhanced phytoremediation of chlorobenzoates in rhizosphere soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 31, p. 299-305, 1999.

SINDAG. Mercado de defensivos – Câmara temática de insumos agropecuários. 2008. Disponível em <http://www.sindag.com.br>. Acesso em: 18/11/2009.

US EPA. United States Environmental Protection Agency. **Introduction to Phytoremediation**. EPA/600/R-99/107. Cincinnati, OH, 2000. 104 p.



Tabuleiros Costeiros

Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento

