

Fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone em função do tempo de cultivo de *Canavalia ensiformis*

Phytoremediation of soil contaminated with sulfentrazone by the cultivation time of Canavalia ensiformis

João Carlos Madalão^{1*}, Fábio Ribeiro Pires², Alex Favaro Nascimento³, Kristhiano Chagas⁴, Alberto Cargnelutti Filho⁵, Sergio de Oliveira Procópio⁶

Resumo: A fitorremediação é uma alternativa para a descontaminação de áreas que receberam intensas aplicações de herbicidas. Determinar o período mínimo que as espécies devem permanecer remediando o solo é fundamental para a otimização das áreas a serem cultivadas sem riscos de *carryover*. Objetivou-se com este trabalho avaliar o tempo de cultivo de *Canavalia ensiformis* em solos contaminados com o herbicida sulfentrazone, de modo que essa espécie remedie o solo em níveis satisfatórios. O experimento foi instalado em casa de vegetação, utilizando-se vasos de 10 dm³; e conduzido no delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial (5 x 2), com quatro repetições. Os fatores consistiram de cinco períodos de fitorremediação, ou seja, de tempos de cultivo da fitorremediadora (0, 25, 50, 75 e 100 dias após a semeadura) e dois níveis de sulfentrazone (com herbicida na dose de 400 g ha⁻¹ e sem herbicida). A espécie bioindicadora foi a *Pennisetum glaucum*, cultivada por 42 DAS. Ao longo desse período foram avaliadas as seguintes variáveis: altura de plantas (cm); toxicidade visual (%), utilizando escala que varia de 0 a 100, para ausência de sintomas e morte da planta, respectivamente; e matéria seca da parte aérea (g). Com 75 dias de cultivo da espécie fitorremediadora, não houve diferença entre o solo que recebeu aplicação de herbicida e aquele sem aplicação para as variáveis toxicidade visual, altura e matéria seca da parte aérea da espécie bioindicadora. A *C. ensiformis* precisa ser cultivada por um período mínimo de 75 dias para descontaminar à níveis satisfatórios solos com o sulfentrazone.

Palavras-chave: Bioensaio. Descontaminação. Fitotoxicidade. Residual de herbicidas.

Abstract: Phytoremediation is an option for the decontamination of areas that have received intensive applications of herbicide. Determining the minimum period that a species should remain for remediation of the soil is critical for the optimisation of areas to be cultivated without the risks of *carryover*. The aim of this study was to evaluate the cultivation time of *Canavalia ensiformis* in soil contaminated with the herbicide sulfentrazone, for the species to remediate the soil to satisfactory levels. The experiment was set up in a greenhouse, using 10 dm³ pots in a randomised block design and a 5 x 2 factorial scheme, with four replications. The factors comprised five periods of phytoremediation, i.e. cultivation times of the green-manure species of phytoremediator (0, 25, 50, 75 and 100 days after sowing - DAS), cultivated both with and without the presence of sulfentrazone (400 g ha⁻¹). The species of bio-indicator was *Pennisetum glaucum*, grown for 42 DAS. During this period the following variables were evaluated: plant height (cm); visual toxicity (%), using a scale from 0 to 100 for the absence of symptoms and death of the plant respectively; and shoot dry matter (g). At 75 days of growth of the phytoremediator species, there was no difference between the soil that received the herbicide application and the soil with no application, for the variables visual toxicity, height and shoot dry matter of the bio-indicator species. Cultivation of *C. ensiformis* needs to be for a minimum period of 75 days to decontaminate soils with sulfentrazone to satisfactory levels.

Key words: Bioassay. Decontamination. Phytotoxicity. Herbicide residue.

*Autor para correspondência

Enviado para publicação em 30/06/2015 e aprovado em 29/01/2016

¹Pós-Doutorando, Departamento de Ciências Agrárias e Biológicas, Centro Universitário Norte do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo, Rodovia BR 101 Norte, Km 60, Bairro Litorâneo, 29932-540, São Mateus, ES, Brasil, joacmad@gmail.com

²Docente do Departamento de Ciências Agrárias e Biológicas, Centro Universitário Norte do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil, pires.fr@gmail.com

³Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Espírito Santo, Pinheiros, ES, Brasil, afavaronascimento@gmail.com

⁴Doutorando em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Viçosa, MG, Brasil, kristhianoc@gmail.com

⁵Docente do Departamento de Fitotecnia, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil, alberto.cargnelutti.filho@gmail.com

⁶Embrapa Tabuleiros Costeiros. Aracaju, SE, Brasil. E-mail: sergio.procopio@embrapa.br

INTRODUÇÃO

O controle químico de plantas daninhas é prática comum na atividade agropecuária e consiste em importante tecnologia para a redução dos custos de produção, principalmente, para viabilizar o cultivo de áreas extensas. Todavia, a aplicação de herbicidas persistentes no ambiente pode resultar em problemas com cultivos em sucessão, além da possibilidade de contaminação de águas superficiais e subterrâneas (MANCUSO *et al.*, 2011). Para evitar esse problema, é importante utilizar herbicidas não residuais. No entanto, isso nem sempre é possível devido à falta de opções no mercado de produtos seletivos e eficientes ou, ainda, pela necessidade de se fazer várias aplicações em uma cultura na mesma safra.

A utilização excessiva de herbicidas persistentes tem como consequência a contaminação de extensas áreas a cada safra. Nesse caso, a utilização de plantas remediadoras surge como alternativa para acelerar a degradação dos herbicidas. Várias pesquisas, tanto no Brasil quanto no exterior, têm demonstrado a eficiência dessa técnica em diversos ecossistemas contaminados com compostos orgânicos e inorgânicos (MADALÃO *et al.*, 2012a, b; SANTOS *et al.*, 2012; MITTER *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2014; MITTON *et al.*, 2014).

A fitorremediação envolve o emprego de plantas e sua microbiota associada, além de amenizantes do solo e práticas agrônômicas que, se aplicadas em conjunto, removem, imobilizam ou tornam os contaminantes inofensivos ao ecossistema (PIRES *et al.*, 2003). Estudos envolvendo herbicidas de longo efeito residual têm alcançado êxito com espécies que, além de acelerarem a redução dos níveis dos compostos no solo, resultam em benefícios agrícolas adicionais, como adubos verdes e forrageiras (PIRES *et al.*, 2003).

O sulfentrazone destaca-se entre os herbicidas persistentes no solo, sendo muito utilizado no Brasil nas culturas da cana-de-açúcar, soja e em áreas de reflorestamento (MELO *et al.*, 2010; BLANCO *et al.*, 2010). A persistência desse herbicida aplicado em solo cultivado com soja foi determinada em 376 dias após a aplicação (DAA) de 0,6 kg ha⁻¹. Na dose de 1,20 kg ha⁻¹, a persistência foi superior a 539 DAA (BLANCO; VELINI, 2005). Em solo cultivado com cana-de-açúcar, a persistência do sulfentrazone foi de 601 DAA na dose de 0,6 kg ha⁻¹ e 704 DAA na dose de 1,20 kg ha⁻¹ (BLANCO *et al.*, 2010). Sua meia-vida ($t_{1/2}$) no solo foi estimada entre 34 e 116 dias em solos do Mato Grosso (BRUM *et al.*, 2013). De acordo com FMC corporation (1995), a $t_{1/2}$ do sulfentrazone em solos brasileiros é estimada entre 110 e 280 dias, podendo variar com as condições edafoclimáticas locais.

Além de persistente, o sulfentrazone é classificado como móvel e tem alto potencial de lixiviação (PARAÍBA *et al.*, 2003; MARTINEZ *et al.*, 2008a). Sua solubilidade em água

varia com o pH, sendo de 110, 780 e 1.600 mg L⁻¹ a pH 6,0; 7,0 e 7,5, respectivamente (TOMLIN, 2011; RODRIGUES; ALMEIDA, 2011).

Considerando a área ocupada, especialmente pelas culturas de soja, cana-de-açúcar e eucalipto, além da sua franca expansão no Brasil, e, ainda, a elevada persistência do sulfentrazone no solo, esse herbicida pode constituir-se em fonte de contaminação dos aquíferos, principalmente como resultado de aplicações sequenciais ao longo dos anos na mesma área (EPA, 2015).

Em estudos anteriores, foi comprovada a eficiência da *C. ensiformis* em remediar sulfentrazone (MADALÃO *et al.*, 2012a, b; 2013). Portanto, a partir desse momento, deve-se avaliar aspectos que otimizem sua ação, como, por exemplo, o período mínimo que essa espécie deve remediar o solo até níveis satisfatórios, permitindo, assim, que outra cultura susceptível ao herbicida seja cultivada em sequência, sem o risco de *carryover*.

Dado o exposto, objetivou-se avaliar o tempo de cultivo de *C. ensiformis* em solos contaminados com o herbicida sulfentrazone antes da semeadura da espécie sensível *P. glaucum*.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em casa de vegetação, utilizando-se a espécie fitorremediadora feijão-de-porco (*C. ensiformis*). Vasos com capacidade de 10 dm³, sem furos, foram preenchidos com solo de textura média, classificado como Argissolo Amarelo eutrocoeso típico (EMBRAPA, 2006), coletado na camada de 0-20 cm. Os resultados das análises químicas, realizadas conforme descrito em Embrapa (2006), foram: pH em H₂O (5,4), P e K⁺ extraíveis em Mehlich-1 (3,0 e 72 mg dm⁻³, respectivamente), teores de Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ trocáveis extraídos em KCl 1 mol L⁻¹ (1,8 ; 1,0 e 0,1 cmol_c dm⁻³, respectivamente), H + Al (2,6 cmol_c dm⁻³) e Carbono (22,8 g kg⁻¹). Com os valores obtidos nas análises do solo, foram estimadas a CTC efetiva (3,08 cmol_c dm⁻³), CTC potencial (4,96 cmol_c dm⁻³), a soma de bases trocáveis (2,98 cmol_c dm⁻³), a percentagem de saturação por alumínio (3,24%) e a percentagem de saturação por bases (53,9%). A textura do solo apresentou os seguintes valores: areia - 750 g kg⁻¹, silte - 30 g kg⁻¹ e argila - 220 g kg⁻¹.

O experimento foi conduzido no delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 5x2, com quatro repetições. Os fatores consistiram de cinco períodos de fitorremediação, ou seja, de tempos de cultivo da espécie fitorremediadora (0, 25, 50, 75 e 100 dias após a semeadura - DAS) e dois níveis de sulfentrazone (com herbicida na dose de 400 g ha⁻¹ e sem herbicida).

Após a correção do solo, de acordo com as recomendações técnicas, os vasos foram preenchidos, e os tratamentos com

herbicida sulfentrazone receberam em pré-emergência a dose de 400 g ha⁻¹. A aplicação foi realizada utilizando-se pulverizador pressurizado com CO₂, com volume de calda de 200 L ha⁻¹. Decorridos vinte dias, foi realizada a semeadura da espécie *C. ensiformis* à profundidade de 1 cm, mantendo-se, após o desbaste, quatro plantas por vaso, densidade quatro vezes maior que a recomendada comercialmente para a espécie fitorremediadora. Todos os vasos foram irrigados diariamente, em quantidades que variaram conforme as necessidades hídricas das plantas.

Nas datas pré-estabelecidas, de acordo com os tratamentos, as plantas foram cortadas na altura do coleto, sendo a parte aérea dessas plantas descartada e cessada a irrigação nesses vasos. Aos 100 DAS, realizou-se uma adubação de plantio nos vasos, aplicando-se o equivalente a 400 kg ha⁻¹ do formulado 08-28-16, em seguida, foi semeada a *P. glaucum*, utilizada como planta indicadora da presença do sulfentrazone no solo. Após a emergência, foi feito um desbaste deixando-se duas plantas por vaso, realizando-se, assim, o bioensaio no próprio vaso, conforme Procópio *et al.* (2008).

Aos 28 e 42 DAS de *P. glaucum*, a fitotoxicidade foi avaliada visualmente (%), atribuindo-se notas de acordo com os sintomas na parte aérea das plantas, utilizando escala variando de 0 a 100, para ausência de sintomas e morte da planta, respectivamente. Aos 42 DAS, foi avaliada a altura de plantas (cm), tomando-se como base para medição o meristema apical, e determinada a biomassa seca da parte aérea (g).

Os dados foram submetidos à análise de variância a 5% de significância. Os dados de fitotoxicidade foram transformados em $X^{1/2} + 0,5$, para análise de variância, sendo $X = \%$ de fitotoxicidade. A comparação entre os tratamentos com e sem herbicida foi realizada pelo teste F. O efeito do tempo de cultivo foi estudado por meio de análise de regressão ($p \leq 0,05$). O critério de escolha do modelo foi baseado no grau de significância do coeficiente

de determinação (R^2) e no comportamento biológico do *P. glaucum* em cada tratamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve efeito significativo da interação entre os tempos de cultivos e níveis de sulfentrazone para as características fitotoxicidade aos 28 e 42 DAS, altura de plantas e matéria seca das plantas de *P. glaucum*. Com base nesses resultados, foi desdobrado os efeitos dos tempos de cultivos dentro das doses (Tabela 1 e Figuras 1, 2a e b).

Dentre os tempos de cultivo da espécie fitorremediadora, verificou-se que os sintomas de fitotoxicidade em *P. glaucum* foram menos intensos quando *C. ensiformis* foi cultivada por períodos maiores que 50 dias, sendo que, a partir de 75 dias, não houve diferença estatística entre os tratamentos com e sem herbicida (Tabela 2).

Quando o solo foi cultivado por 25 dias com *C. ensiformis*, os sintomas de fitotoxicidade em *P. glaucum* cultivado em sequência foram de 66,66 e 43,33%, nas avaliações feitas aos 28 e 42 DAS, respectivamente, o que indica que esse tempo de cultivo não é suficiente para descontaminar o solo em níveis que permitam o desenvolvimento do *P. glaucum* sem prejuízos.

No solo onde *C. ensiformis* foi cultivada por 50 dias, verificou-se, em ambas as avaliações, poucos sintomas de fitotoxicidade no *P. glaucum*, indicando que com o aumento do tempo de cultivo da espécie remediadora a descontaminação do solo é mais eficiente. Porém, com esse tempo de cultivo, ainda houve sintomas de injúrias. Nota-se que, onde o solo não foi pré-cultivado com *C. ensiformis*, os sintomas de fitotoxicidade foram mais intensos, indicando a importância da planta remediadora nesse solo.

Para uma determinada espécie fitorremediadora, a redução do tempo para descontaminação do solo é uma característica importante, pois permitirá a liberação da

Tabela 1 - Resumo da análises de variância das características: fitotoxicidade (FIT) aos 28 e 42 DAS, altura de plantas (ALT) e matéria seca da parte aérea (MSPA) do *P. glaucum* colhido aos 42 DAS

Table 1 – Summary of analysis of variance for the characteristics: phytotoxicity (FIT) at 28 and 42 DAS, plant height (ALT) and shoot dry matter (MSPA) in *P. glaucum* harvested at 42 DAS

FV	GL	¹ FIT 28 DAS	¹ FIT 42 DAS	ALT	MSPA
Bloco	3	1,446 ^{NS}	1,568 ^{NS}	2,093 ^{NS}	1,395 ^{NS}
Dose do herbicida	1	692,536*	675,981*	92,986*	33,104*
Tempo de cultivo	4	98,727*	111,934*	30,655*	20,128*
Dose x Tempo	4	98,727*	111,934*	24,756*	10,672*
CV (%)		19,82	19,61	10,55	18,20

^{NS}não significativo, *significativo a 5% pelo teste F.

^{NS}not significant, *significant at 5% by F test.

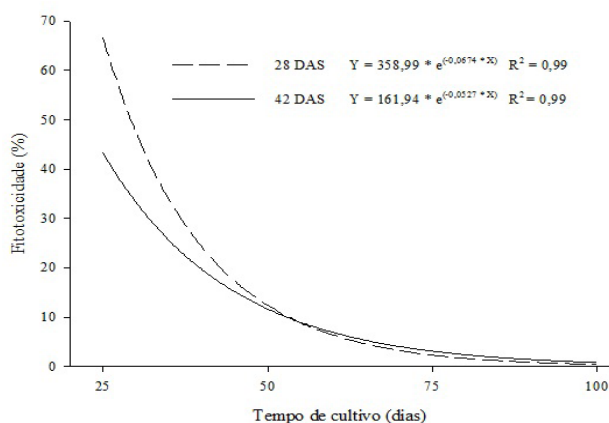
Tabela 2 - Fitotoxicidade (%) em plantas de *P. glaucum*, aos 28 e 42 DAS, em solo não cultivado e cultivado previamente com *C. ensiformis* por cinco tempos, na presença e ausência de sulfentrazone

Table 2 - Phytotoxicity (%) in plants of *P. glaucum* at 28 and 42 days after sowing (DAS), in soil previously not cultivated and cultivated with *C. ensiformis* for five different periods, in the presence and absence of sulfentrazone

28 DAS		
Tempo de cultivo (dias)	Sulfentrazone	
	sem	com
Sem cultivo	0 b	93,3 a*
25	0 b	66,66 a
50	0 b	11,66 a
75	0 a	4,00 a
100	0 a	1,00 a
DMS	0,82	
42 DAS		
Tempo de cultivo (dias)	Sulfentrazone	
	sem	com
Sem cultivo	0 b	87,5 a
25	0 b	43,33 a
50	0 b	11,66 a
75	0 a	3,33 a
100	0 a	0,00 a
DMS	0,73	

Figura 1 - Fitotoxicidade (%) em plantas de *P. glaucum*, aos 28 e 42 DAS, em função de diferentes tempos de cultivo de *C. ensiformis*, na presença de sulfentrazone.

Figure 1 - Phytotoxicity (%) in plants of *P. glaucum* at 28 and 42 DAS, for different cultivation times of *C. ensiformis* in the presence of sulfentrazone.



área mais rapidamente para o cultivo de uma espécie reconhecidamente sensível ao xenobiótico em questão. Menor, também, será a probabilidade desse composto lixiviar no solo e atingir os mananciais de água presentes no subsolo ou ser carregado por erosão para outras áreas não contaminadas ou cursos d'água.

Os sintomas de fitotoxicidade nas plantas de *P. glaucum*, em função dos diferentes períodos de cultivo de *C. ensiformis*, estão representados na Figura 1. Verificou-se que, à medida que o tempo de cultivo aumentou, os sintomas de fitotoxicidade diminuíram de forma significativa e que, a partir de 75 DAS, aproxima-se de zero. Essa redução nos sintomas de intoxicação está relacionada à remediação do herbicida no solo ao longo do tempo.

Observou-se na Tabela 3 a redução progressiva da altura das plantas de *P. glaucum*, na qual *C. ensiformis* foi pré-cultivada por 25 e 50 dias. Quando cultivou-se *C. ensiformis* por 75 e 100 dias, as plantas de *P. glaucum* não apresentaram redução da altura em relação às plantas de *P. glaucum*, cultivadas em locais livres da presença de sulfentrazone. No solo não pré-cultivado com *C. ensiformis*, a redução da altura no *P. glaucum* foi mais expressiva, evidenciando a alta sensibilidade dessa espécie ao sulfentrazone e o efeito residual do herbicida no solo.

O incremento nas taxas de altura observadas nas plantas de *P. glaucum*, com o decorrer do tempo de cultivo de *C. ensiformis*, possivelmente, está relacionado à remediação do composto pelas plantas. O maior tempo de permanência da planta remediadora no solo pode ter favorecido as interações associativas com micro-organismos capazes de promover a degradação do herbicida, conhecida por rizodegradação (PIRES *et al.*, 2009), via mais importante de degradação do sulfentrazone no solo (MARTINEZ *et al.*, 2008a, b; RODRIGUES e ALMEIDA, 2011). As plantas liberam exudatos, que estimulam a atividade microbiana na região rizosférica e, conseqüentemente, atuam quebrando o composto por cometabolismo ou para sua utilização como substrato (YOUSAF *et al.*, 2011; KHAN *et al.*, 2013; AFZAL *et al.*, 2014).

A seletividade de herbicidas inibidores da enzima PROTOX em espécies tolerantes pode ser atribuída à absorção e translocação mínima, ao sequestro de herbicida, à concentração aumentada da enzima PROTOX mitocondrial, que serve como redutor para o excesso de protoporfirinogênio no citoplasma (HIGGINS *et al.*, 1988; MATSUMOTO *et al.*, 1999), bem como à rápida metabolização (VAUGHN e DUKE, 1991). Velini *et al.* (2005) verificaram que configurações da enzima PROTOX ou promotores que permitiriam diferentes níveis de expressão podem permitir genótipos que sejam mais tolerantes aos herbicidas que atuam na inibição dessa enzima. Possivelmente, no mecanismo de tolerância da *C. ensiformis* ao sulfentrazone, ocorreu degradação do produto, visto que o *P. glaucum* não é afetado quando cultivado em sequência.

Tabela 3 - Altura (cm) e matéria seca da parte aérea (g) de *P. glaucum*, aos 42 DAS, em solo não cultivado e cultivado previamente com *C. ensiformis*, por cinco tempos, na presença e ausência de sulfentrazone

Table 3 – Height (cm) and shoot dry matter (g) of *P. glaucum* at 42 DAS, in soil previously not cultivated and cultivated with *C. ensiformis* for five different periods, in the presence and absence of sulfentrazone

Altura de plantas		
Tempo de cultivo (dias)	Sulfentrazone	
	Sem	Com
Sem cultivo	50,7 a*	10,4 b
25	48,16 a	29,91 b
50	50,91 a	42,16 b
75	52,00 a	48,00 a
100	52,50 a	53,33 a
Média	50,85	36,76
DMS	14,64	
Matéria seca da parte aérea		
Tempo de cultivo (dias)	Sulfentrazone	
	Sem	Com
Sem cultivo	20,10 a*	1,4 b
25	19,78 a	11,82 b
50	23,27 a	18,16 b
75	23,99 a	23,48 a
100	22,08 a	23,33 a
Média	21,84	15,63
DMS	9,15	

Semelhante ao que ocorreu com a altura e a fitotoxicidade, verificou-se que, para matéria seca de plantas, não houve diferença estatística entre os tempos de cultivo de 75 e 100 dias, entre a testemunha sem herbicida e os solos tratados com sulfentrazone (Tabela 3), indicando novamente que 75 dias é o tempo mínimo necessário para que *C. ensiformis* promova a descontaminação do solo em níveis satisfatórios, permitindo que *P. glaucum*, cultivado em sequência, produza biomassa de maneira semelhante a locais sem a presença do sulfentrazone.

Observou-se na Figura 2A comportamento linear do incremento na altura de *P. glaucum*, cultivado após *C. ensiformis*, nos diferentes tempos de cultivo, no tratamento com presença do herbicida. Isso demonstra o efeito benéfico da sucessão dessa espécie, reforçando a possibilidade de utilização de *C. ensiformis* em programas de fitorremediação que envolvam a liberação da área para o plantio de culturas sensíveis ao sulfentrazone.

Na Figura 2B, representou-se a curva referente à matéria seca do *P. glaucum*, cultivado após *C. ensiformis* nos diferentes tempos de cultivo. Observou-se que os tratamentos com *C. ensiformis*, a partir de 75 dias,

garantiram o pleno desenvolvimento das plantas de *P. glaucum*, possibilitando melhor acúmulo de matéria seca e diminuindo o risco de *carryover*.

O efeito residual *carryover* de sulfentrazone, aplicado em anos anteriores, ocasionou reduções superiores a 30% no rendimento do algodão em Oklahoma e 20% nos estados de Arkansas e Carolina do Norte nos Estados Unidos da América (MAIN *et al.*, 2004). No Brasil, o *P. Glaucum* e o *Sorghum bicolor* foram altamente afetados quando cultivados em sucessão a soja, que recebeu aplicação em pré-emergência do sulfentrazone (DAN *et al.*, 2010; DAN *et al.*, 2011).

Nas condições em que o experimento foi conduzido, o tempo de permanência das plantas de *C. ensiformis* por 75 dias foi suficiente para proporcionar ausência de sintomas de fitotoxicidade, acúmulo de matéria seca na parte aérea e ganho em altura nas plantas de *P. glaucum*, na presença de herbicida de sulfentrazone. Carmo *et al.* (2008a, b) concluíram que tanto a espécie *Eleusine coracana* quanto a *Panicum maximum* precisam ser cultivadas no mínimo por 60 dias em solos contaminados com picloram, para promover sua descontaminação de modo a permitir que a soja e o tomate se desenvolvam nesses solos.

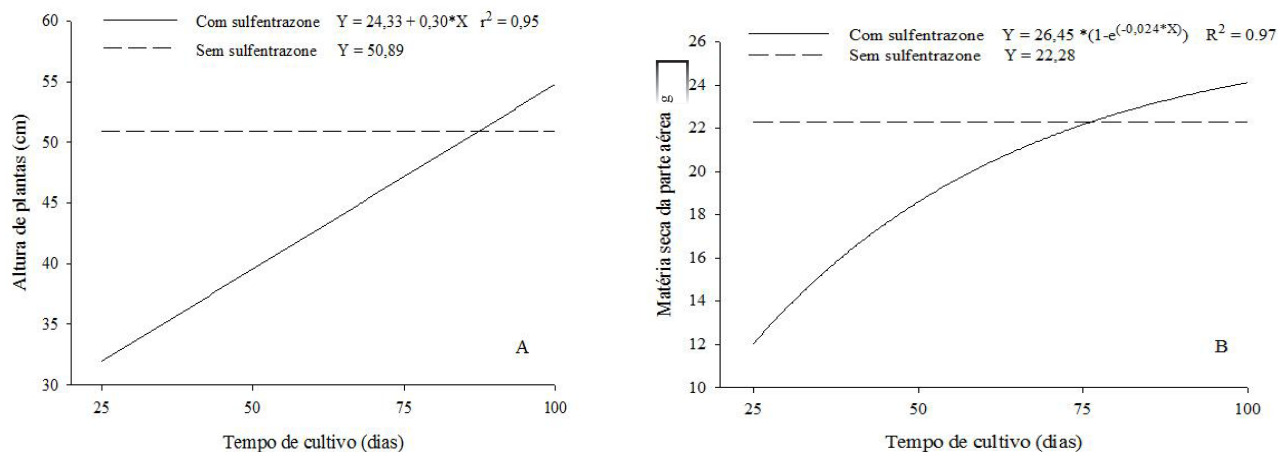


Figura 2 - Altura (cm) (A) e matéria seca da parte aérea (g) (B) de *P. glaucum*, aos 42 DAS, em função de diferentes tempos de cultivo de *C. ensiformis*, na presença e ausência de sulfentrazone.

Figure 2 - Height (cm) (A) and shoot dry matter (g) (B) in *P. glaucum* at 42 DAS, for different cultivation times of *C. ensiformis* in the presence and absence of sulfentrazone.

O uso da fitorremediação proporciona a maior segurança do plantio de espécies sensíveis em áreas onde o sulfentrazone tenha sido utilizado, como, por exemplo, o milho e o sorgo plantado na safrinha sucedendo a soja, ou substituindo espécies perenes, como o eucalipto e a cana-de-açúcar. Além disso, o cultivo de espécies fitorremediadoras reduz os impactos ambientais, como a contaminação de cursos d'água por escoamento superficial e a contaminação do lençol freático por lixiviação.

A determinação do período mínimo que *C. ensiformis* deve ser cultivada, de forma a permitir o cultivo de espécies sensíveis ao sulfentrazone em sequência, otimiza a utilização da área. No entanto, a continuação dos estudos de fitorremediação, utilizando-se essa espécie, é necessária, agora, em campo, visando a confirmação dos resultados obtidos.

CONCLUSÕES

O tempo de cultivo da espécie *C. ensiformis* influencia na fitorremediação do herbicida sulfentrazone;

Canavalia ensiformis deve ser cultivada por um período mínimo de 75 dias para promover a fitorremediação de solos contaminados com o herbicida sulfentrazone na dose de 400 g ha⁻¹ em níveis satisfatórios e, com isso, permitir que espécies não tolerantes sejam cultivadas em sucessão.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo financiamento e pelas Bolsas concedidas.

LITERATURA CIENTÍFICA 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. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1. p. 299-352.

AFZAL, M.; KHAN, Q. M. ; SESSITSCH, A. Endophytic bacteria: prospects and applications for the phytoremediation of organic pollutants. **Chemosphere**, v. 117, p. 232-242, 2014.

- BLANCO, F. M. G.; VELINI, E. D. Persistência do herbicida sulfentrazone em solo cultivado com soja e seu efeito em culturas sucedâneas. **Planta Daninha**, v. 23, n. 4, p. 693-700, 2005.
- BLANCO, F. M. G.; VELINI, E. D.; BATISTA FILHO, A. Persistência do herbicida sulfentrazone em solo cultivado com cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 71-75, 2010.
- BRUM, C. S.; FRANCO, A. A.; SCORZA JÚNIOR, R. P. Degradação do herbicida sulfentrazone em dois solos de Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 5, p. 558-564, 2013.
- CARMO, M. L.; PROCÓPIO, S. O.; 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.; PACHECO, L. P. Influência do período de cultivo de *Panicum maximum* (cultivar tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com picloram. **Planta Daninha**, v. 26, n. 2, p. 315-322, 2008a.
- CARMO, M. L.; PROCÓPIO, S. O.; 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.; PACHECO, L. P. Influência do período de cultivo do capim-pé-de-galinha-gigante (*Eleusine coracana*) na fitorremediação de solo contaminado com picloram. **Planta Daninha**, v. 26, n. 3, p. 601-609, 2008b.
- DAN, H. A.; DAN, L. G. M.; BARROSO, A. L. L.; PROCÓPIO, S. O.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; ASSIS, R. L.; SILVA, A. G.; FELDKIRCHER, C. Atividade residual de herbicidas pré-emergentes aplicados na cultura da soja sobre o milheto cultivado em sucessão. **Planta Daninha**, v. 29, n. 2, p. 437-445, 2011.
- DAN, H. A.; DAN, L. G. M.; BARROSO, A. L. L.; PROCÓPIO, S. O.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; SILVA, A. G.; LIMA, M. D. B.; FELDKIRCHER, C. Residual activity of herbicides used in soybean agriculture on grain sorghum crop succession. **Planta Daninha**, v. 28, n. 5, p. 1087-1095, 2010.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Registration review proposed interim decisions; availability**. 2015. Disponível em: <http://www.regulations.gov/#!documentDetail;D=EPA-HQ-OPP-2009-0624-0021>. Acesso em: 19 dez. 2015.
- FMC CORPORATION. **Technical bulletin of sulfentrazone**. Philadelphia, 1995. 6 p.
- HIGGINS, J. M.; WHITWELL, T.; CORBIN, F. T.; CARTER JÚNIOR, G. E.; HILL JÚNIOR, H. S. Absorption, translocation, and metabolism of acifluorfen and lactofen in pitted morningglory (*Ipomoea lacunosa*) and ivyleaf morning glory (*Ipomoea hederacea*). **Weed Science**, v. 36, n. 2, p. 141-145, 1988.
- KHAN, S.; AFZAL, M.; IQBAL, S.; KHAN, Q. M. Plant-bacteria partnerships for the remediation of hydrocarbon contaminated soils. **Chemosphere**, v. 90, n. 4, p. 1317-1332, 2013.
- MADALÃO, J. C. PIRES, F. R.; CARGNELUTTI FILHO, A.; CHAGAS, K.; NASCIMENTO, A. F.; GARCIA, G. de O. Fitorremediação de solos contaminados com o herbicida sulfentrazone por espécies de adubos verdes. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 55, n. 4, p. 288-296, 2012b.
- MADALÃO, J. C.; PIRES, F. R.; CARGNELUTTI FILHO, A.; NASCIMENTO, A. F.; CHAGAS, K.; ARAÚJO, R. S.; PROCÓPIO, S. O.; BONOMO, R. Susceptibilidade de espécies de plantas com potencial de fitorremediação do herbicida sulfentrazone. **Revista Ceres**, v. 60, n. 1, p. 111-121, 2013.
- MADALÃO, J. C.; PIRES, F. R.; CHAGAS, K.; CARGNELUTTI FILHO, A.; PROCÓPIO, S. O. Uso de leguminosas na fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 4, p. 390-396, 2012a.
- MAIN, C. L.; MUELLER, T. C.; HAYES, R. M.; WILCUT, J. W.; PEEPER, T. F.; TALBERT, R. E.; WITT, W. W. Sulfentrazone persistence in southern soils: bioavailable concentration and effect on a rotational cotton crop. **Weed Technology**, v. 18, n. 2, p. 346-352, 2004.
- MANCUSO, M. A. C.; NEGRISOLI, E.; PERIM, L. Efeito residual de herbicidas no solo ("Carryover"). **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 10, n. 2, p. 151-164, 2011.
- MARTINEZ, C. O.; SILVA, C. M. M. S.; FAY, E. F.; ABAKERLI, R. B.; MAIA, A. N.; DURRANT, L. R. The effects of moisture and temperature on the degradation of sulfentrazone. **Geoderma**, v. 147, n. 1/2, p. 56-62, 2008b.
- MARTINEZ, C. O.; SILVA, C. M. M. S.; FAY, E. F.; MAIA, A. H. N.; ABAKERLI, R. B.; DURRANT, L. R. Degradation of the herbicide sulfentrazone in a Brazilian Typic Hapludox soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, n. 4, p. 879-888, 2008a.

- MATSUMOTO, H.; KASHIMOTO, Y.; WARABI, E. Basis for common chickweed (*Stellaria media*) tolerance to oxyfluorfen. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 64, n. 1, p. 47-53, 1999.
- MELO, C. A. D.; MEDEIROS, W. N.; TUFFI SANTOS, L. D.; FERREIRA, F. A.; FERREIRA, G. L.; PAES, F. A. S. V.; REIS, M. R. Efeito residual de sulfentrazone, isoxaflutole e oxyfluorfen em três solos. **Planta Daninha**, v. 28, n. 4, p. 835-842, 2010.
- MITTER, B.; PETRIC, A.; SHIN, M. W.; CHAIN, P. S.; HAUBERG-LOTTE, L.; REINHOLD-HUREK, B.; NOWAK, J.; SESSITSCH, A. Comparative genome analysis of Burkholderia phytofirmans PsJN reveals a wide spectrum of endophytic lifestyles based on interaction strategies with host plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 1-15, 2013.
- MITTON, M. F.; MIGLIORANZA, K. S. B.; GONZALEZ, M.; SHIMABUKURO, V. M.; MONSERRAT, J. M. Assessment of tolerance and efficiency of crop species in the phytoremediation of DDT polluted soils. **Ecological Engineering**, v. 71, p.501-508, 2014.
- OLIVEIRA, V.; GOMES, N. C. M.; ALMEIDA, A.; SILVA, A. M. S.; SIMÕES, M. M. Q.; SMALLA, K.; CUNHA, A. Hydrocarbon contamination and plant species determine the phylogenetic and functional diversity of endophytic degrading bacteria. **Molecular Ecology**, v. 23, n. 6, p. 1392-1404, 2014.
- PARAÍBA, L. C.; CERDEIRA, A. L.; SILVA, E. F.; MARTINS, J. S.; COUTINHO, H. L. C. Evaluation of soil temperature effect on the herbicide leaching potential into groundwater in the brazilian cerrado. **Chemosphere**, v. 53, n. 9, p. 1087-1095, 2003.
- PIRES, F. R.; EGREJA FILHO, F. B.; PROCÓPIO, S. O. Inferências sobre mineralogia dos solos, sorção e fitorremediação de herbicidas. In: FERREIRA, A.; LIMA, A. B. P.; MATTA, F. P.; AMARAL, J. A. T.; LOPES, J. C.; PEZZOPANE, J. E. M.; FERREIRA, M. F. S.; POLANCZYK, R. A.; SOARES, T. C. B. (Ed.). **Tópicos Especiais em Produção Vegetal I**. 1. ed. Vitória: EDUFES, 2009. p. 391-406.
- PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; SILVA, A. A.; PROCÓPIO, S. O.; FERREIRA, L. R. Fitorremediação de solos contaminados por herbicidas. **Planta Daninha**, v. 21, n. 2, p. 335-341, 2003.
- 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 Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2517-2523, 2008.
- RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. Londrina: Edição dos autores, 2011. 592 p.
- SANTOS, C. H.; GARCIA, A. L. O.; CALONEGO, J. C.; TIRITAN, C. S.; RIGOLIN, I. M.; SPÓSITO, T. H. N. Utilização da mucuna preta (*Mucuna aterrima* Piper & Tracy) para a fitorremediação de solo contaminado por chumbo. **Revista Agro@ambiente**, v. 6, n. 3, p. 215-221, 2012.
- TOMLIN, C. D. S. **The pesticide manual: a world compendium**. 15th. ed. Croydon: British Crop Protection Council, 2011. 1457 p.
- VAUGHN, K. C.; DUKE, S. O. Mechanisms of resistance. In: EBING, W. **Chemistry of plant protection**. New York: Springer-Verlag, 1991. p. 142-169.
- VELINI, E. D.; TRINDADE, M. L. B.; ALVES, E.; CATÂNEO, A. C.; MARINO, C. L.; MAIA, I. G.; MORI, E. S.; FURTADO, E. L.; GUERRINI, I. A.; WILCKEN, C. F. Eucalyptus ESTs corresponding to the protoporphyrinogen IX oxidase enzyme related to the synthesis of heme, chlorophyll, and to the action of herbicides. **Genetics and Molecular Biology**, v. 28, n. 3, p. 555-561, 2005.
- YOUSAF, S.; AFZAL, M.; REICHENAUER, T. G.; BRADY, C. L.; SESSITSCH, A. Hydrocarbon degradation, plant colonization and gene expression of alkane degradation genes by endophytic *Enterobacter ludwigii* strains. **Environmental Pollution**, v. 159, n. 10, p. 2675-2683, 2011.