

Efeito da densidade populacional de *Canavalia ensiformis* na fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone¹

Effect of population density of *Canavalia ensiformis* on the phytoremediation of soil contaminated with sulfentrazone

Mariana Ferraço², Fábio Ribeiro Pires^{2*}, Alessandra Ferreira Belo², Ademar Celin Filho² e Robson Bonomo²

RESUMO - Existem poucas informações quanto à fitorremediação do herbicida sulfentrazone, reforçando assim a necessidade de pesquisas que visam oferecer alternativas seguras para sua utilização em sistemas que integram a sucessão/rotação de culturas, focando a sustentabilidade da produção agrícola, sem prejuízos ao sistema produtivo e ao ambiente. Com isso, objetivou-se neste trabalho avaliar a influência da densidade populacional de *Canavalia ensiformis* sobre a fitorremediação de solo contaminado com o herbicida sulfentrazone. O experimento constou de um fatorial 4 x 3, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído pela combinação de quatro densidades populacionais da espécie fitorremediadora *C. ensiformis* (0; 10; 20 e 40 plantas m⁻²) e o segundo por três doses do herbicida sulfentrazone (0; 200 e 400 g ha⁻¹). Aos 75 dias após a emergência, as plantas foram cortadas na altura do coletor. Nesse mesmo período, efetuou-se, no próprio vaso, a semeadura da espécie bioindicadora da presença do sulfentrazone, milheto (*Pennisetum glaucum*), na qual foram avaliadas a fitotoxicidade, a altura e a biomassa fresca e seca da parte aérea e da raiz. O cultivo prévio da espécie fitorremediadora *C. ensiformis* promoveu a remediação do solo contaminado com sulfentrazone. A densidade populacional mínima de *C. ensiformis* que possibilita o desenvolvimento do milheto é de 10 plantas m⁻². Todavia, melhores resultados foram obtidos na densidade de 40 plantas m⁻².

Palavras-chave: Descontaminação do solo. Adubos verdes. Herbicida. Biorremediação.

ABSTRACT - There is little information on the phytoremediation of the herbicide sulfentrazone. This reinforces the need for research aimed at providing safe alternatives to its use in systems that integrate crop succession or rotation, focusing on the sustainability of agricultural production, and without harming the production system or the environment. The aim of this study therefore, was to evaluate the influence of population density in *Canavalia ensiformis* on the phytoremediation of soil contaminated with the herbicide sulfentrazone. The experiment consisted of a 4 x 3 factorial in a completely randomised design with four replications. The first factor comprised a combination of four population densities of the species *C. ensiformis*, used in phytoremediation, (0, 10, 20 and 40 plants m⁻²), and the second of three doses of the herbicide sulfentrazone (0, 200 and 400 g ha⁻¹). At 75 days after emergence, the plants were cut level with the collar. At the same time, pearl millet (*Pennisetum glaucum*), a bioindicator species for sulfentrazone, was planted in each pot, and the phytotoxicity was evaluated together with the height, and fresh and dry shoot and root biomass. Earlier cultivation of the species, *C. ensiformis*, helped remediation of soil contaminated with sulfentrazone. The minimum population density of *C. ensiformis* which allows millet to develop is 10 plants m⁻²; however, better results were obtained at a density of 40 plants m⁻².

Key words: Soil decontamination. Green manures. Herbicide. Bioremediation.

DOI: 10.5935/1806-6690.20170004

*Autor para correspondência

¹Recebido para publicação em 22/08/2013; aprovado em 20/04/2016

Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor; pesquisa realizada com suporte financeiro da CAPES e do CNPq

²Departamento de Ciências Agrárias e Biológicas, Centro Universitário Norte do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo, Rodovia BR 101 Norte, Km 60, Litorâneo, São Mateus-ES, Brasil, 29.932-540, marianaferraco@yahoo.com.br, pires.fr@gmail.com, ferreiragro@yahoo.com.br, ademar_celin@hotmail.com, robson.bonomo@gmail.com

INTRODUÇÃO

Existe atualmente grande preocupação no que diz respeito à contaminação ambiental causada pela utilização incorreta de xenobióticos. Sabe-se que o manejo incorreto desses produtos é considerado um dos principais fatores responsáveis pela degradação ambiental (LAW, 2001; PIRES *et al.*, 2005).

As moléculas herbicidas enquadram-se entre as substâncias que representam risco de contaminação devido a sua persistência, toxicidade e bioacumulação. Os herbicidas, ao serem aplicados em pré ou pós-emergência, acabam direta ou indiretamente alcançando o solo, podendo causar danos às culturas subsequentes, à flora e à fauna do solo (CELIS *et al.*, 2005; SANTOS; INFANTE; MASINI, 2010). Ao atingirem o solo, iniciam-se os processos de redistribuição e degradação desses compostos, os quais podem ser extremamente curtos, como o que ocorre com algumas moléculas simples e não persistentes, ou perdurar por meses ou anos, tal como ocorre com compostos altamente persistentes (FILIZOLA *et al.*, 2002).

Dentre os herbicidas que apresentam longo período residual no solo destaca-se o sulfentrazone, que é recomendado para uso em pré-emergência no controle de plantas daninhas nas culturas da cana-de-açúcar, soja, citrus, café, eucalipto e em áreas não agrícolas (RODRIGUES; ALMEIDA, 2005). Por apresentar longa persistência no solo, este herbicida pode inviabilizar o cultivo de plantas sensíveis por um longo período após a sua aplicação, dependendo da dose aplicada e das condições edafoclimáticas (VIVIAN *et al.*, 2006).

Para minimizar o impacto ambiental causado pelo uso de herbicidas vem sendo utilizada a técnica da fitorremediação que consiste na utilização de espécies vegetais para acelerar a desintoxicação de solos e águas contaminados com compostos tóxicos (CUNNINGHAM; ANDERSON; SCHWAB, 1996).

Pesquisas envolvendo espécies vegetais como adubos verdes para remediação de solos contaminados estão sendo mais indicadas (MONQUERO *et al.*, 2013) pois, além de essas espécies serem tolerantes a diversos herbicidas, podem ainda liberar exsudatos radiculares, que atuam ativando a microbiota do solo na decomposição dos compostos orgânicos aplicados, promovendo a bioestimulação. Além disso, produzem elevada biomassa fresca e seca e, quando forem leguminosas, promovem a fixação do nitrogênio atmosférico, o que é bastante desejável ao sistema produtivo.

Dentre as espécies de adubos verdes selecionadas com potencial para fitorremediação do sulfentrazone, *Crotalaria juncea* e *Canavalia ensiformis* (MADALÃO *et al.*, 2012), assim como *Helianthus annus*, *Canavalia*

ensiformis, *Dolichos lab lab* e *Arachis hypogaea* (BELO *et al.*, 2011) estão entre as que apresentam maior tolerância a esse herbicida.

Diversos estudos, com resultados promissores, vêm sendo desenvolvidos visando avaliar a eficácia de plantas na remoção de herbicidas do solo (BELO *et al.*, 2011; MONQUERO *et al.*, 2013; PIRES *et al.*, 2008; PROCÓPIO *et al.*, 2009; SANTOS *et al.*, 2006), todavia existem poucas informações quanto a fitorremediação do herbicida sulfentrazone, reforçando assim a necessidade de pesquisas que visam oferecer alternativas seguras para sua utilização em sistemas que integram a sucessão/rotação de culturas, focando a sustentabilidade da produção agrícola, sem prejuízos ao sistema produtivo e ao ambiente. Além disso, há necessidade de se estabelecer as melhores práticas agrícolas visando otimizar o desempenho das espécies em um programa de fitorremediação do sulfentrazone, como densidade de plantas por área, tempo necessário para fitorremediar determinado contaminante e a influência de amenizantes aplicados ao solo.

Diante do exposto, objetivou-se, com este trabalho, avaliar a influência da densidade populacional de *Canavalia ensiformis* sobre a fitorremediação de solo contaminado com o herbicida sulfentrazone.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no município de São Mateus, ES, que está situado a uma latitude Sul de 18° 42' 50" e uma longitude Oeste de 39° 50' 53", no período de agosto de 2011 a fevereiro de 2012. O experimento constou de um fatorial 4 x 3, no delineamento inteiramente casualizados, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído pela combinação de quatro densidades populacionais da espécie fitorremediadora *Canavalia ensiformis* (feijão-de-porco) e o segundo de três doses de sulfentrazone (0, 200 e 400 g ha⁻¹), totalizando 12 tratamentos.

As densidades de *Canavalia ensiformis* utilizadas foram de 0; 10; 20 e 40 plantas m⁻². Essas densidades correspondem a 0, 1x, 2x, e 4x a densidade recomendada na prática da adubação verde.

Como substrato para o crescimento das plantas utilizaram-se amostras de solo classificado como Argissolo Amarelo Coeso de textura arenosa de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2006), coletadas em área sem histórico de aplicação de herbicidas na profundidade de 0,0-0,20 m, que foram peneiradas em malha de 4 mm e posteriormente caracterizadas quanto à textura e à fertilidade (Tabela 1). Essa caracterização serviu de

Tabela 1 - Composição química e textural da camada arável (0,0-0,20 m) do solo utilizado no experimento

Análise Granulométrica g kg ⁻¹									
Argila		Silte		Areia		Classificação textural			
120	104				776				Franco Arenoso
Análise Química									
pH	P	K+	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al	Al ³⁺	CTC	V	MO
H ₂ O	----- mg dm ⁻³ -----			----- cmol _c dm ⁻³ -----				%	dag kg ⁻¹
5,2	90	17	0,6	0,2	2,4	0,4	3,2	26,0	2,0

*Análise de substrato realizada pelo Fullin - Laboratório de Análise Agronômica, Linhares - ES, 2011

base para a correção e adubação dos vasos visando um bom desenvolvimento da espécie avaliada como fitorremediadora.

Os adubos foram utilizados nas seguintes dosagens por vaso: 6,54 g de calcário dolomítico, 2,22 g de nitrogênio, 11,11 g de fósforo, 2,5 g de potássio, 0,046 g de ácido bórico, 0,052g de sulfato de cobre, 0,077g de sulfato ferroso, 0,112g de sulfato de manganês e 0,019g de molibdato de amônio.

Após o preparo do solo, o mesmo foi colocado em vasos de 24 cm de altura, revestidos com filme de polietileno, visando mantê-los como um sistema fechado. Foram utilizados 10,0 kg do substrato por vaso, pesados individualmente quando de seu preenchimento. Estes foram irrigados ajustando a umidade do solo em valor próximo a 80% da capacidade de campo, fazendo-se a seguir a aplicação do sulfentrazone com o auxílio de um micropulverizador, aplicando volume de calda equivalente a 200 L ha⁻¹.

A semeadura da espécie fitorremediadora *Canavalia ensiformis* foi realizada 8 dias após a aplicação do sulfentrazone. Sete dias após a emergência (DAE) foi realizado o desbaste, deixando-se o número de plantas por vaso correspondente a cada tratamento. Foram feitas irrigações três vezes ao dia para a manutenção da umidade do solo em 60% da capacidade de campo (CC). O valor de CC foi determinado em teste preliminar à implantação do experimento, empregando a metodologia proposta por Casaroli e Jong van Lier (2008), considerando uma taxa de decréscimo do teor de água |dθ/dt| = 0,001 d⁻¹.

Aos 75 DAE, as plantas foram cortadas na altura do coletor. Neste mesmo período, foi realizada a coleta de amostras de solo para nova análise química (pH, macro e micronutrientes). Após a análise dos resultados procedeu-se uma adubação de plantio específica para cada tratamento, a fim de se uniformizar a disponibilidade de nutrientes em cada unidade experimental.

Terminada esta etapa foi realizada a semeadura da espécie bioindicadora da presença do sulfentrazone

no solo, milheto (*Pennisetum glaucum* var. ADR7010), distribuindo-se 15 sementes por vaso. O milheto foi utilizado com base em sua elevada suscetibilidade ao sulfentrazone, comprovada em experimentos anteriores (MADALÃO *et al.*, 2012). Após a emergência da planta bioindicadora, foi realizado o desbaste deixando-se duas plantas de milheto por vaso. Estas foram irrigadas diariamente conforme descrito anteriormente.

Aos 25 e 42 DAE do milheto foram avaliadas a fitotoxicidade de forma visual utilizando-se escala percentual, onde 0 (zero) significa ausência de sintomas (redução da altura das plantas, clorose e necrose das folhas), e 100% morte de todas as plantas, e a altura de plantas, utilizando-se escala graduada, tendo como referência o meristema apical.

Aos 42 DAE o milheto foi cortado rente ao solo, sendo o material vegetal imediatamente pesado em balança analítica, determinando-se a biomassa fresca da parte aérea. A mesma determinação foi efetuada para as raízes, após serem retiradas cuidadosamente dos vasos e lavadas. Posteriormente, o material vegetal (parte aérea e raiz) foi colocado em estufa de circulação forçada de ar (70 ± 2 °C) até obter peso constante, e pesado novamente em balança analítica, determinando-se assim a biomassa seca da parte aérea e da raiz. Esses procedimentos foram realizados conforme Procópio *et al.* (2008) e Madalão *et al.* (2013).

Após a coleta e tabulação dos dados, estes foram submetidos à análise de variância, com teste F ao nível de 5%. A análise dos efeitos significativos da densidade populacional da espécie fitorremediadora dentro de cada dose do herbicida foi realizada por análise de regressão, sendo os coeficientes das equações testados pelo teste *t* a 5% de significância, cujas equações foram ajustadas conforme a variável em questão e seu respectivo comportamento biológico. Os efeitos significativos das doses do sulfentrazone, em cada densidade populacional, foram verificados por meio do teste de Tukey a 5% de significância, devido ao número insuficiente de níveis para o ajuste das equações de regressão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teste F da análise de variância revelou que os efeitos significativos entre as médias ocorreram em todas as variáveis, somente na interação entre os fatores densidade e dose nas variáveis biomassa seca da parte aérea e biomassa fresca da raiz não foram significativas (dados não apresentados).

Ao avaliar o crescimento e o desenvolvimento do milheto, após ser cultivado em solo contaminado com sulfentrazone e fitorremediado por *Canavalia ensiformis*, verificou-se que aos 25 e 42 DAE a altura de *Pennisetum glaucum* (milheto - planta bioindicadora) reduziu com o aumento da dose de sulfentrazone, independentemente da densidade populacional da espécie fitorremediadora *C. ensiformis* (Tabela 2). Isso pode ter ocorrido em função de que algumas moléculas do herbicida ainda permanecem no solo mesmo após o cultivo de *C. ensiformis*, indicando que houve uma diminuição dos efeitos tóxicos, mas não a remediação completa do sulfentrazone no solo.

O cultivo prévio das plantas de *C. ensiformis* reduziu a fitotoxicidade sobre as plantas de *P. glaucum* tanto aos 25 quanto aos 42 DAE. Quando não se efetuou a fitorremediação e aplicou-se a dose de 400 g ha⁻¹ de sulfentrazone, as plantas de *P. glaucum* não sobreviveram (Tabela 2). Isso aponta para o efeito significativo do cultivo da espécie fitorremediadora antecedendo ao milheto e também para a importância da fitorremediação na descontaminação de solos contaminados com sulfentrazone. O efeito benéfico da fitorremediação em áreas agrícolas foi comprovado por Procópio *et al.* (2009) ao cultivar previamente capim tanzânia e verificar que este reduziu substancialmente a fitotoxicidade sobre as plantas de soja, decorrente dos resíduos do herbicida picloram presente no solo.

O aumento das densidades populacionais de *C. ensiformis* cultivada em solos contaminados com 200 e 400 g ha⁻¹ de sulfentrazone resultou em aumento da altura nas plantas de *P. glaucum* aos 25 e 42 DAE, contudo, maior descontaminação ocorreu com a utilização de 40 plantas m⁻² (Figura 1 e Tabela 3). Esse

Tabela 2 - Altura e fitotoxicidade em plantas de *Pennisetum glaucum* semeadas após o cultivo prévio de *Canavalia ensiformis*, em quatro densidades populacionais, em solo contaminado com três níveis do herbicida sulfentrazone

Dose de sulfentrazone g ha ⁻¹	Plantas de <i>C. ensiformis</i> m ⁻²			
	0	10	20	40
Altura (cm) aos 25 DAE*				
0	20,37 a	19,93 a	19,87 a	21,62 a
200	11,96 b	15,22 b	15,41 b	16,93 b
400	0,00 c	7,02 c	8,21 c	12,71 c
C.V. (%)	17,16			
Altura (cm) aos 42 DAE				
0	114,65 a	124,87 a	135,50 a	138,25 a
200	67,42 b	80,37 b	90,65 b	95,92 b
400	0,00 c	21,62 c	35,00 c	53,52 c
C.V. (%)	8,69			
Fitotoxicidade (%) aos 25 DAE				
0	0,00 c	0,00 c	0,00 c	0,00 c
200	67,50 b	42,87 b	35,00 b	32,50 b
400	100,00 a	81,75 a	80,50 a	71,25 a
C.V. (%)	17,31			
Fitotoxicidade (%) aos 42 DAE				
0	0,00 c	0,00 c	0,00 c	0,00 c
200	68,75 b	46,25 b	31,25 b	20,75 b
400	100,00 a	82,50 a	72,50 a	58,75 a
C.V. (%)	18,56			

*Médias seguidas por mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. *DAE: dias após a emergência

resultado mostra que a eficiência de *C. ensiformis* em descontaminar o solo contaminado com sulfentrazone aumenta em função do aumento da densidade de planta e isso pode ser devido ao maior número de raízes absorvendo o herbicida do solo assim como, maior número de plantas em associação com a microbiota do solo degradando o sulfentrazone.

Com relação à fitotoxicidade, o aumento da densidade populacional de *C. ensiformis*, cultivada nos vasos onde foi realizado aplicação prévia do sulfentrazone, provocou diminuição da fitotoxicidade nas plantas de *P. glaucum*, todavia, assim como observado para altura de plantas, os melhores resultados foram obtidos quando a fitorremediação ocorreu empregando-se a densidade de 40 plantas m^{-2} de *C. ensiformis*. Na dose de 400 g ha^{-1} , onde não houve o cultivo prévio de *C. ensiformis*, as plantas de *P. glaucum* tiveram 100% de intoxicação (Figura 1). Este fato comprova a sensibilidade de *P.*

glaucum ao sulfentrazone, que também foi comprovada por Dan *et al.* (2011) ao analisar a atividade residual desse herbicida, aplicado em pré-emergência na cultura da soja, sobre o milheto cultivado em sucessão. Também reforça a importância de se remediar a área antes de seu cultivo, visando abreviar sua implantação.

Com relação à biomassa fresca da parte aérea e da raiz das plantas de *P. glaucum* observou-se que à medida que se aumentou a dose de sulfentrazone ocorreu uma redução dessa variável, independentemente das densidades populacionais avaliadas (10; 20 e 40 plantas m^{-2}) (Tabela 4). Essa redução pode ser explicada por não ter ocorrido 100% de fitorremediação do solo por *C. ensiformis*. O cultivo prévio de *C. ensiformis*, independentemente das densidades avaliadas, não evitou o efeito negativo do trifloxsulfuron sodium no solo sobre o acúmulo de biomassa seca da parte aérea de plantas de feijão (SANTOS *et al.*, 2006).

Figura 1 - Altura e fitotoxicidade em plantas de *Pennisetum glaucum* aos 25 e 42 dias após a emergência (DAE), semeadas após o cultivo prévio de *Canavalia ensiformis*, em função da densidade populacional, em solo contaminado com três níveis do herbicida sulfentrazone

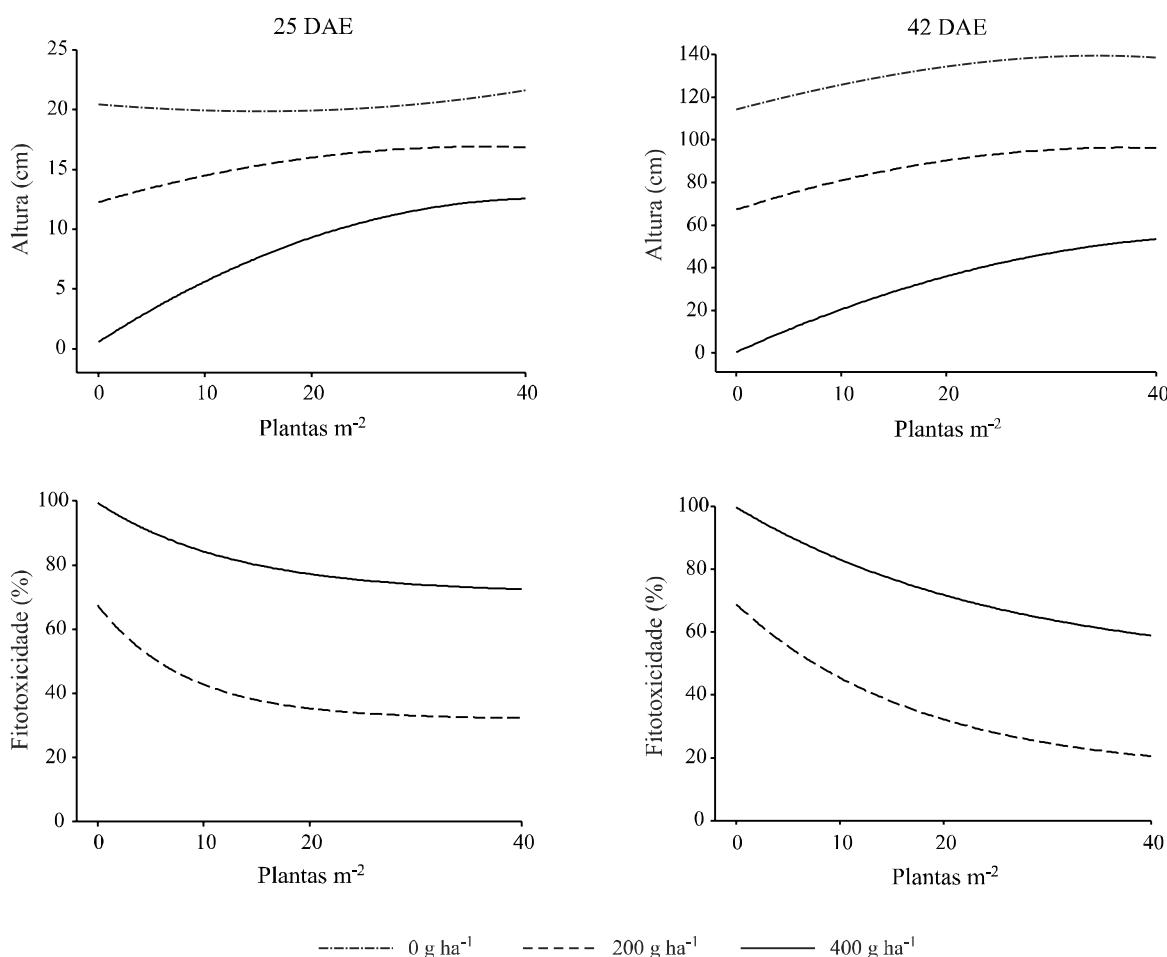


Tabela 3 - Equações de regressão para valores médios de altura e fitotoxicidade, aos 25 e 42 dias após a emergência (DAE), de *Pennisetum glaucum* cultivado após *Canavalia ensiformis* sob quatro densidades populacionais, em solo contaminado com três níveis do herbicida sulfentrazone

Dose g ha ⁻¹	25 DAE		42 DAE	
	Altura (cm)		Equação	R ²
	Equação	R ²		
0	$\hat{Y} = 20,4368 - 0,0824X + 0,0028^{**} X^2$	0,99	$\hat{Y} = 114,1127 + 1,4234X - 0,0204^{**} X^2$	0,99
200	$\hat{Y} = 12,1964 + 0,2518X - 0,0034^{**} X^2$	0,95	$\hat{Y} = 67,2273 + 1,5836X - 0,0216^{**} X^2$	0,99
400	$\hat{Y} = 0,5320 + 0,5727X - 0,0068^{**} X^2$	0,96	$\hat{Y} = 0,4507 + 2,2220X - 0,0225^{**} X^2$	0,99
Fitotoxicidade (%)				
0				
200	$\hat{Y} = 32,0651 + 35,4559 e^{(0,1202^{**} X)}$	0,99	$\hat{Y} = 14,9862 + 53,9645 e^{(0,0572^{**} X)}$	0,99
400	$\hat{Y} = 71,2546 + 28,2262 e^{(0,0775^{**} X)}$	0,97	$\hat{Y} = 47,8110 + 51,9996 e^{(0,0386^{**} X)}$	0,99

** Significativo a 1% pelo teste *t***Tabela 4** - Biomassa fresca e seca da parte aérea e da raiz de *Pennisetum glaucum*, aos 42 dias após a emergência, semeado após o cultivo prévio de *Canavalia ensiformis*, em quatro densidades populacionais, em solo contaminado com três níveis do herbicida sulfentrazone

Dose de sulfentrazone g ha ⁻¹	Plantas de <i>C. ensiformis</i> m ⁻²			
	0	10	20	40
Biomassa fresca da parte aérea (g)				
0	321,00 a	330,00 a	360,25 a	362,50 a
200	232,50 b	261,50 b	276,00 b	296,50 b
400	0,00 c	89,00 c	90,25 c	91,87 c
C.V. (%)	9,91			
Biomassa seca da parte aérea (g)				
0	45,00 a	50,96 a	58,54 a	64,97 a
200	37,34 a	43,48 a	42,88 b	47,46 b
400	0,00 b	10,42 b	10,47 c	11,05 c
C.V. (%)	16,60			
Biomassa fresca da raiz (g)				
0	76,00 a	117,00 a	130,00 a	131,75 a
200	58,00 a	76,50 b	87,00 b	100,00 b
400	0,00 b	36,00 c	37,00 c	38,50 c
C.V. (%)	16,66			
Biomassa seca da raiz(g)				
0	26,58 a	34,63 a	39,01 a	43,96 a
200	18,61 a	25,10 a	29,02 a	31,75 a
400	0,00 b	8,52 b	9,97 b	11,07 b
C.V. (%)	30,80			

*Médias seguidas por mesma letra, na coluna, dentro de cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%

A aplicação de 200 g ha⁻¹ de sulfentrazone no solo não interferiu na biomassa seca da parte aérea e da raiz de *P. glaucum*, cultivado após o cultivo prévio de *C. ensiformis* nas densidades de 0 e 10 plantas m⁻² quando comparado com a ausência do sulfentrazone. Onde se cultivou anteriormente *C. ensiformis* nas densidades de 20 e 40 plantas m⁻² houve uma redução na biomassa seca da parte aérea com o aumento do sulfentrazone no solo, no entanto, para a biomassa seca da raiz houve redução somente na dose de 400 g ha⁻¹ de sulfentrazone (Tabela 4).

O cultivo prévio de *C. ensiformis* nas densidades populacionais de 10; 20 e 40 plantas m⁻² contribuiu para o aumento da biomassa fresca e seca da parte aérea e da raiz das plantas de *P. glaucum*, independentemente do nível de contaminação do herbicida sulfentrazone (Figura 2), sendo suas equações de regressão apresentadas na Tabela 5. Todavia, na maior dose de sulfentrazone avaliada (400 g ha⁻¹), a densidade de 10 plantas m⁻² de *C. ensiformis* mostrou-se adequada para

a descontaminação do solo. A partir dessa densidade, o aumento do número de plantas por área não influenciou na eficácia do processo de fitorremediação. Isso, provavelmente, ocorreu devido à competição entre as plantas por luz, água e nutrientes.

De acordo com Procópio *et al.* (2008) a competição intraespecífica pode ser a causa do não aumento na eficiência da fitorremediação pelo incremento na densidade populacional de *Eleusine coracana*, uma vez que o excesso de plantas pode acarretar limitação da exploração do solo, com consequente estabilização da interceptação/remoção do picloram pelo sistema radicular das plantas de *Eleusine coracana*. Contrariando, todavia, esses resultados, observa-se também que na dose zero há aumento da biomassa de *P. glaucum* com aumento da população de *C. ensiformis*. Isso se deveu, provavelmente, aos efeitos da presença do adubo verde na melhoria da qualidade do solo (BELO *et al.*, 2016; FUMAGALLI *et al.*, 2014). Como exemplo, pode-se citar que uso de

Figura 2 - Biomassa fresca e seca da parte aérea e da raiz de *Pennisetum glaucum* aos 42 dias após a emergência, semeado após o cultivo prévio de *Canavalia ensiformis*, em função da densidade populacional, em solo contaminado com três níveis do herbicida sulfentrazone

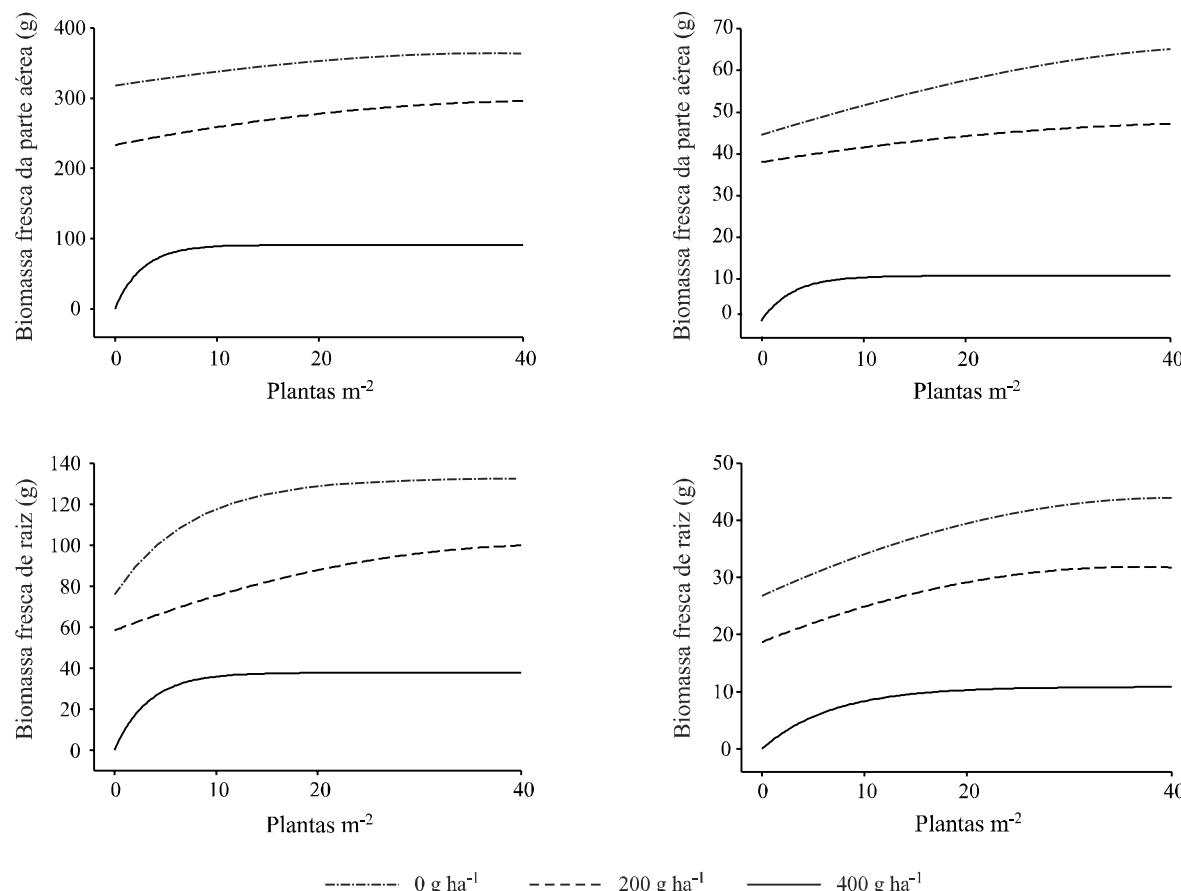


Tabela 5 - Equações de regressão para valores médios de biomassa fresca e seca da parte aérea e da raiz aos 42 dias após a emergência de *Pennisetum glaucum* cultivado após *Canavalia ensiformis* sob quatro densidades populacionais, em solo contaminado com três níveis do herbicida sulfentrazone

Dose g ha ⁻¹	Equação	R ²	Equação	R ²
	Biomassa fresca da parte aérea		Biomassa seca da parte aérea	
0	$\hat{Y} = 317,6727 + 2,4439X - 0,0324^{**}X^2$	0,90	$\hat{Y} = 44,6300 + 0,8053X - 0,0073^{**}X^2$	0,99
200	$\hat{Y} = 233,4545 + 2,8773X - 0,0327^{**}X^2$	0,99	$\hat{Y} = 38,0496 + 0,3956X - 0,0042^{**}X^2$	0,88
400	$\hat{Y} = 91,1065 (1 - e^{(0,3749^{**}X)})$	0,99	$\hat{Y} = 10,7803 (1 - e^{(0,3357^{**}X)})$	0,99
Biomassa fresca da raiz				
0	$\hat{Y} = 75,9209 + 56,8428(1 - e^{(0,1324^{**}X)})$	0,99	$\hat{Y} = 26,7801 + 0,8347X - 0,0102^{**}X^2$	0,99
200	$\hat{Y} = 58,4364 + 1,9082X - 0,0218^{**}X^2$	0,99	$\hat{Y} = 18,6831 + 0,7220X - 0,0099^{**}X^2$	0,99
400	$\hat{Y} = 37,8344 (1 - e^{(0,2987^{**}X)})$	0,99	$\hat{Y} = 10,8988 (1 - e^{(0,1464^{**}X)})$	0,99

** Significativo a 1% pelo teste t

espécies de adubos verdes em pré-cultivo ao feijoeiro proporcionou maior rendimento de grãos, com maior destaque para feijão-de-porco e crotalaria (GALLO *et al.*, 2015). Os principais efeitos das plantas de cobertura são verificados na melhoria da fertilidade do solo, via fixação de N e ciclagem de nutrientes (CICEK *et al.*, 2014), na melhoria da estrutura do solo, minimizando a formação de camadas compactadas, adicionando carbono e nitrogênio ao solo (WIESMEIER *et al.*, 2015), e no aumento da diversidade faunística, contribuindo expressivamente para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (ALMAGRO; MARTÍNEZ-MENA, 2014).

Os resultados obtidos neste trabalho representam a conclusão de uma etapa para o estabelecimento de um programa de fitoremedação de sulfentrazone com enfoque agronômico/ambiental, para o qual, de acordo com Santos *et al.* (2007), o uso de práticas agronômicas mais adequadas à condução das espécies remediadoras, como a densidade populacional, o tempo de cultivo necessário, o número de ciclos de cultivo e a aplicação de amenizantes podem incrementar a eficiência da fitoremediação e ainda a economia de recursos.

CONCLUSÕES

1. O cultivo prévio da espécie *Canavalia ensiformis* promove a redução dos efeitos tóxicos em solo contaminado com sulfentrazone;
2. A densidade populacional mínima de *Canavalia ensiformis* que possibilita o desenvolvimento do *Pennisetum glaucum* é de 10 plantas m⁻². Todavia, melhores resultados são obtidos na densidade de 40 plantas m⁻².

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro e concessão de bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALMAGRO, M.; MARTÍNEZ-MENA, M. Litter decomposition rates of green manure as affected by soil erosion, transport and deposition processes, and the implications for the soil carbon balance of a rainfed olive grove under a dry Mediterranean climate. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 196, n. 10, p. 167-177, 2014.
- BELO, A. F. *et al.* Potencial de espécies vegetais na remediação de solo contaminado com sulfentrazone. *Planta Daninha*, v. 29, n. 4, p. 821-828, 2011.
- BELO, A. F. *et al.* Sulfentrazone phytoremediation under field conditions. *Revista Caatinga*, v. 29, n. 1, p. 119-126, 2016.
- CASAROLI, D.; JONG VAN LIER, Q. Critérios para determinação da capacidade de vaso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 1, p. 59-66, 2008.
- CELIS, R. *et al.* Sorption and leaching behaviour of polar aromatic acids in agricultural soils by batch and column leaching tests. *European Journal of Soil Science*, v. 56, n. 3, p. 287-297, 2005.
- CICEK, H. *et al.* Effects of grazing two green manure crop types in organic farming systems: N supply and productivity of following grain crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 190, n. 6, p. 27-36, 2014.
- CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. *Advances in Agronomy*, v. 56, n. 1, p. 55-114, 1996.

- DAN, H. A. *et al.* 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.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.
- FILIZOLA, H. F. *et al.* Monitoramento e avaliação do risco de contaminação por pesticidas em água superficial e subterrânea na região de Guaíra. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 5, p. 659-667, 2002.
- FUMAGALLI, P. *et al.* The rotation of white lupin (*Lupinus albus* L.) with metal-accumulating plant crops: a strategy to increase the benefits of soil phytoremediation. **Journal of Environmental Management**, v. 145, n. 12, p. 35-42, 2014.
- GALLO, A. S. *et al.* Produtividade da cultura do feijoeiro em sucessão a adubos verdes, com adição de dejetos líquidos de suínos. **Revista Facultad de Agronomía La Plata**, v. 114, n. 3, p. 45-51, 2015.
- LAW, S. E. Agricultural electrostatic spray application: a review of significant research and development during de 20th century. **Journal of Electrostatics**, v. 51, n. 1, p. 25-42, 2001.
- MADALÃO, J. C. *et al.* Selection of species tolerant to the herbicide sulfentrazone with potential for phytoremediation of contaminated soils. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 6, p. 2199-2214, 2012.
- MADALÃO, J. C. *et al.* Susceptibilidade de espécies de plantas com potencial de fitorremediação do herbicida sulfentrazone. **Revista Ceres**, v. 60, n. 1, p. 111-121, 2013.
- MONQUERO, P. A. *et al.* Seleção de espécies de adubos verdes visando à fitorremediação de diclosulam. **Planta Daninha**, v. 31, n. 1, p. 127-135, 2013.
- PIRES, F. R. *et al.* Avaliação da fitorremediação de tebuthiuron utilizando *Crotalaria juncea* como planta indicadora. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 2, p. 245-250, 2008.
- PIRES, F. R. *et al.* Influências sobre a atividade rizosférica de espécies com potencial para fitorremediação do herbicida tebuthiuron. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 627-634, 2005.
- PROCÓPIO, S. O. *et al.* Efeito da densidade populacional de *Panicum maximum* (cultivar Tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com o herbicida picloram. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 30, n. 2, p. 295-304, 2009.
- PROCÓPIO, S. O. *et al.* 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. 2517-2524, 2008.
- RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 5 ed. Londrina: Edição dos Autores, 2005. 591 p.
- SANTOS, J. B. *et al.* Fitorremediação de áreas contaminadas por herbicidas residuais. In: SILVA, A. A.; SILVA, J. F. (Ed.) **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa: UFV, 2007. p. 249-278.
- SANTOS, J. B. *et al.* Fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium por diferentes densidades populacionais de feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC.). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n. 3, p. 444-449, 2006.
- SANTOS, L. B. O.; INFANTE, C. M. C.; MASINI, C. Determination of picloram in Waters by sequential injection chromatography with UV detection. **Journal of Brazilian Chemical Society**, v. 21, n. 8, p. 1557-1562, 2010.
- VIVIAN, R. *et al.* Persistência de sulfentrazone em Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 24, n. 4, p. 741-750, 2006.
- WIESMEIER, M. *et al.* Remediation of degraded arable steppe soils in Moldova using vetch as green manure. **Solid Earth**, v. 6, n. 2, p. 609-620, 2015.