

JOÃO CARLOS MADALÃO

**FITORREMEDIAÇÃO DO SULFENTRAZONE EM ARGISSOLO
VERMELHO-AMARELO E SUA SORÇÃO E DESSORÇÃO EM DIFERENTES
TIPOS DE SOLOS**

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

VIÇOSA,
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

M178f
2014 Madalão, João Carlos, 1983-
Fitorremediação do sulfentrazone em Argissolo
Vermelho-Amarelo e sua sorção e dessorção em diferentes
tipos de solos / João Carlos Madalão. - Viçosa, MG, 2014.
viii, 46f. : il. ; 29 cm.

Orientador : Antonio Alberto da Silva.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Biorremediação. 2. Solos - Efeito de herbicidas.
3. Plantas e solo. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Fitotecnia. Programa de Pós-graduação
em Fitotecnia. II. Título.

CDD 22. ed. 628.55

JOÃO CARLOS MADALÃO

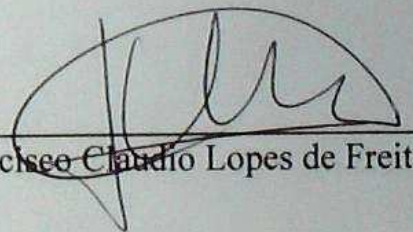
**FITORREMEDIAÇÃO DO SULFENTRAZONE EM ARGISSOLO
VERMELHO-AMARELO E SUA SORÇÃO E DESSORÇÃO EM DIFERENTES
TIPOS DE SOLOS**

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

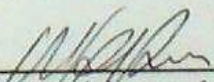
APROVADA: 07 de novembro de 2014.



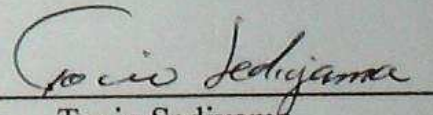
Fábio Ribeiro Pires



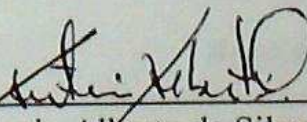
Francisco Cláudio Lopes de Freitas



Marcelo Rodrigues dos Reis



Tocio Sedyama



Antonio Alberto da Silva
(Orientador)

Aos meus pais, José Carlos e Luiza,
aos meus irmãos, Gilson, Regina e
Anna e a minha noiva Marina.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pai criador.

A Jesus, companheiro de todas as horas.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), por intermédio do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pela oportunidade concedida e pela acolhida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa e a FAPEMIG pelo apoio financeiro.

Ao professor Antonio Alberto da Silva, pela orientação, confiança e amizade.

Ao professor Leonardo d'Antonino, pelos conselhos e sugestões, que contribuíram para realização deste trabalho.

Aos professores Fábio Ribeiro Pires, Marcelo Rodrigues dos Reis, Francisco Claudio Lopes de Freitas e Tocio Sedyama pela gentileza de participarem da banca examinadora e pelas sugestões no texto final da tese.

Aos meus pais, José Carlos e Luiza, pela vida, formação, incentivo e carinho.

Aos meus irmãos Gilson, Regina e Anna Maria, pela amizade, carinho e incentivo.

A minha noiva Marina e sua família, cujo incentivo foi de grande importância para a realização deste trabalho.

Aos graduandos e pós-graduandos da equipe Manejo Integrado de Plantas Daninhas (MIPD) pela amizade, parceria disponibilidade, apoio e conselhos. De modo especial, agradeço aos colegas Autieres Teixeira, Felipe Paolinelli, Daniel Valadão, Christiane Augusta, Gustavo Antônio e Ana Beatriz pelos incentivos e apoio fundamentais para que fosse possível concluir este trabalho.

Às demais pessoas que, de alguma forma, contribuíram para o êxito deste trabalho.

BIOGRAFIA

JOÃO CARLOS MADALÃO, filho de José Carlos Madalão e Luiza Cancian Madalão, nasceu em Vitória, Espírito Santo, no dia 23 de junho de 1983.

Em agosto de 2009 graduou-se em Agronomia pela Universidade Federal do Espírito Santo, em Alegre, ES.

Em julho de 2011 tornou-se Mestre em Produção Vegetal pela Universidade Federal do Espírito Santo.

Em março de 2012 iniciou o curso de Doutorado no Programa de Pós-graduação em Fitotecnia pela Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese em 7 de novembro de 2014.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3
IMPACTO DO SULFENTRAZONE NA BIOMASSA MICROBIANA E NA ATIVIDADE DA MICROBIOTA DO SOLO	4
RESUMO.....	4
ABSTRACT	4
INTRODUÇÃO	5
MATERIAL E MÉTODOS.....	7
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
AGRADECIMENTOS	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
AÇÃO DA <i>Canavalia ensiformis</i> NA REMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM SULFENTRAZONE	17
RESUMO.....	17
ABSTRACT	17
INTRODUÇÃO	18
MATERIAL E MÉTODOS.....	20
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
AGRADECIMENTOS	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
SORÇÃO E DESSORÇÃO DO SULFENTRAZONE EM SOLOS CULTIVADOS DO BRASIL	32
RESUMO.....	32
ABSTRACT	32
INTRODUÇÃO	33
MATERIAL E MÉTODOS.....	34
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
AGRADECIMENTOS	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
CONSIDERAÇÕES FINAIS	46

RESUMO

MADALÃO, João Carlos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2014. **Fitorremediação do sulfentrazone em Argissolo Vermelho-Amarelo e sua sorção e dessorção em diferentes tipos de solos.** Orientador: Antonio Alberto da Silva. Coorientador: Leonardo d'Antonino.

Objetivou-se nesta pesquisa avaliar a remediação do sulfentrazone em um Argissolo Vermelho-Amarelo e sua sorção e dessorção em diferentes tipos de solo. Para os estudos da remediação, inicialmente foi avaliada a biomassa e a atividade microbiana do solo em amostras coletadas em área tratada ou não com o sulfentrazone e cultivada ou não com *Canavalia ensiformis*. Essas amostras foram coletadas aos 15 e 70 dias após o plantio da espécie remediadora. Numa segunda etapa, em campo, foi avaliada a eficiência de *C. ensiformis* em remediar o solo contaminado com o sulfentrazone; para isso, foi utilizado o sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor*) como bioindicador. Neste experimento, os tratamentos foram arranajados em esquema fatorial 2 x 3 - solo tratado ou não com o sulfentrazone associado a três manejos de *C. ensiformis*. Os manejos consistiram na ausência de cultivo, cultivo e incorporação ao solo de *C. ensiformis* por ocasião de seu florescimento e cultivo, com retirada da parte aérea das plantas dessa espécie das parcelas experimentais após a roçada. Após esse processo, foi cultivado o sorgo, e aos 20, 40 e 60 dias após o plantio foi avaliada a altura das plantas. Aos 120 dias após o plantio, foram determinados o número de plantas, a matéria seca e a produtividade do sorgo. Os estudos de sorção e dessorção do sulfentrazone foram realizados utilizando cromatografia líquida de alta eficiência em amostras de cinco solos (Neossolo Regolítico, Argissolo Vermelho, Cambissolo Húmico e os Latossolos Vermelho-Amarelo Húmico e Latossolo Vermelho-Amarelo, em dois valores de pH). Observaram-se oscilações nos valores da evolução de CO₂ e do carbono da biomassa microbiana em amostras de solo coletadas nos diferentes tratamentos. O quociente metabólico (qCO₂) foi menor nos tratamentos com aplicação do sulfentrazone e com o cultivo da planta remediadora. O cultivo de *C. ensiformis* nas áreas tratadas com o sulfentrazone proporcionou produção de matéria seca, número de plantas, produtividade e altura de plantas de sorgo equivalentes aos do cultivo em área não contaminada pelo herbicida. A retirada ou não dos restos culturais da planta remediadora não alterou a produtividade do sorgo. A sorção do sulfentrazone foi superior em solos com maiores teores de matéria orgânica e argila, e a sua dessorção foi baixa em todos os solos. Dos solos avaliados, o Cambissolo foi o que apresentou o menor índice de dessorção e o

menor índice de histerese. Concluiu-se que *C. ensiformis* pode ser utilizada como espécie remediadora do sulfentrazone e que este herbicida apresenta baixa capacidade de sorção e dessorção nos solos avaliados.

ABSTRACT

MADALÃO, João Carlos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2014. **Phytoremediation of sulfentrazone in Red-Yellow Ultisol and their sorption and desorption in different soil types.** Adviser: Antonio Alberto da Silva. Co-adviser: Leonardo d'Antonino.

The research objective was to evaluate sulfentrazone remediation in a Ultisol and their sorption and desorption in different soil types. For studies of remediation was initially evaluated biomass and microbial activity in soil samples collected in the area treated or not treated with sulfentrazone and cultivated or not cultivated with *Canavalia ensiformis*. These samples were collected at 15 and 70 days after planting the remedial species. In a second stage under field conditions, It was evaluated *C. ensiformis* remediating soil efficiency contaminated with sulfentrazone, for this, we used the sorghum (*Sorghum bicolor*) as bioindicator. In this experiment, the treatments were arranged in a 2x3 factorial - treated soil or not treated with sulfentrazone associated with three *C. ensiformis* managements. The management consisted in the cultivation absence; cultivation and *C. ensiformis* soil amendment because of its flowering and growing with removal of *C. ensiformis* plants part area from experimental plots after mowing. After this process, it was cultivated sorghum and at 20, 40 and 60 days after planting was evaluated plant height. 120 days after planting was determined the plants numbers, dry matter and sorghum productivity. Studies of sulfentrazone sorption and desorption were performed using liquid chromatography high efficiency in five soil samples (Entisol, Typic, Humic, and the Red-Yellow Oxisols Humic and Oxisol at two pH values). Observed fluctuations in the CO₂ evolution values and microbial biomass carbon in soil samples collected in the different treatments. The metabolic quotient (qCO₂) was lower with sulfentrazone application and with remedial plan cultivation. *C. ensiformis* cultivation in treated areas with sulfentrazone provided dry matter production, plants numbers, sorghum plants productivity and height equivalent to grown in uncontaminated area by herbicides. The removal or not of remedial plan cultural remains did not change the sorghum productivity. The sulfentrazone sorption was higher in soils with higher organic matter and clay and its desorption was low in all soils. Among the Inceptisol soils, was presented the highest sorption index, and low hysteresis index. It was concluded that *C. ensiformis* can be used as sulfentrazone remedial species and herbicide shows low capacity for sorption and desorption in the soil assessed.

INTRODUÇÃO GERAL

Antes de se recomendar um herbicida, é de grande importância conhecer as suas interações com o ambiente. Esse conhecimento irá permitir ao profissional garantir a eficiência técnica e ambiental da sua recomendação. Quando entra em contato com o solo, um herbicida pode ser absorvido pelas plantas e microrganismos, ser adsorvido pelos colóides do solo ou ser lixiviado superficialmente ou através do perfil do solo (SILVA et al., 2007). Além desses processos, os herbicidas que atingiram o solo podem, ainda, ser volatilizados e degradados por ações biológicas, físicas e químicas.

Entre os herbicidas que apresentam longa persistência no solo, destaca-se o sulfentrazone (N - [2,4-dicloro-5-[4-(difluorometil)-4,5-diidro-3 metil -5-oxo-1H- 1,2,4-triazol-1-il] metanosulfonamida).

Esse herbicida, que pertence ao grupo químico das aril triazolinonas, pode ser absorvido pelas raízes e pelas folhas e translocado nas vias apoplasto, possuindo movimento limitado no floema. Ele inibe a atividade da PROTOX (enzima localizada no cloroplasto envolvida na biossíntese de clorofila), o que leva, por consequência, ao acúmulo de protoporfirina IX, causando peroxidação do oxigênio e destruição das membranas celulares (HESS, 1993; REDDY; LOCKE, 1998). Apresenta pressão de vapor de 1×10^{-9} mmHg a 25 °C, constante de dissociação (pKa) de 6,56 e coeficiente de partição ($K_{ow_{pH7}}$) de 9,79. A degradação microbiana do sulfentrazone é considerada o primeiro fator de dissipação, e a 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). No Brasil, o sulfentrazone é registrado para as culturas de cana-de-açúcar, eucalipto, citros, café, abacaxi, soja e fumo (RODRIGUES; ALMEIDA, 2011; AGROFIT, 2014).

O sulfentrazone controla com eficiência diversas espécies de plantas dicotiledôneas, gramíneas e Cyperaceae, em especial *Cyperus rotundus* podendo ser aplicado em pré-emergência ou em pré-plantio incorporado (TONLIN, 2011; RODRIGUES; ALMEIDA, 2011).

A utilização de herbicidas que têm longa persistência no solo, como o sulfentrazone, é importante para manter as culturas que apresentam longo período crítico de interferência com as plantas daninhas, como a cana-de-açúcar (PIRES et al., 2008). Contudo, o uso desses produtos sem o conhecimento de suas interações com o solo pode resultar em sérios problemas ambientais, inviabilizando o cultivo de culturas

sensíveis em rotação, além da contaminação de águas superficiais e subterrâneas. Uma das técnicas para redução da persistência de herbicidas no solo tem sido a adoção do cultivo de espécies vegetais que possuem a capacidade de remover ou prover a aceleração da degradação desses compostos no ambiente, seja no solo ou na água, promovendo sua descontaminação (CUNNINGAM et al., 1996). A grande vantagem desse método é ser essencialmente ‘verde’ e de baixo custo.

De acordo com Santos et al. (2007), os principais processos envolvidos na fitorremediação de herbicidas são: fitoextração, na qual o herbicida é absorvido pelas raízes e, em consequência, pode ser armazenado nas próprias raízes ou transportado e acumulado nas partes aéreas (fitoacumulação). Em alguns casos, o composto é imobilizado na planta ou humificado na rizosfera de forma não disponível para os microrganismos (fitoestabilização). Quando o herbicida é convertido em forma volátil, é liberado na atmosfera, ocorrendo a fitovolatilização. Se o produto for metabolizado e convertido em um composto não tóxico ou menos tóxico que a molécula original, tem-se a fitodegradação. Paralelamente à extração do herbicida, a planta pode ainda liberar exsudatos no solo, estimulando a proliferação da comunidade microbiana e consequente degradação do composto, o que caracteriza a fitoestimulação.

Neste trabalho, objetivou-se avaliar a capacidade de *Canavalia ensiformis* para remediar o sulfentrazone em um Argissolo Vermelho-Amarelo, bem como a sorção e dessorção em diferentes tipos de solo, além do impacto desse herbicida sobre a biomassa e atividade microbiana do solo com e sem o cultivo da *C. ensiformis*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGROFIT – **Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários**. 2014. Disponível em: http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acessado em: 26 de outubro de 2014.
- BOUCHARD, D.C. Transport processes involving organic chemicals. In: SAWHNEY, B.L.; BROWN, B.L, (Ed). **Reations and movement of organic chemicals in soil: Madson, Soil Science Societ of Americana**, 1989. p.349-372.
- CUNNINGHAM, S.D.; ANDERSON, T.A.; SCHWAB, A.P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Advances in Agronomy**, v.56, p.55-114, 1996.
- HESS, D. F. Herbicide effects on plant struture, physiology, and biochemistry. In: Altman, J. **Pesticide Interactions in Crop Production: beneficial and deleterious effects**, Boca Raton: CRC Press, 1993, p. 13-34.
- PIRES, F.R. et al. Avaliação da fitorremediação de tebuthiuron utilizando Crotalaria junceacomo planta indicadora. **Revista Ciência Agrônômica**, v.39, p.245-250, 2008.
- REDDY, K. N.; LOCKE, M. A. Sulfentrazone sorption, desorption, and mineralization in soils from two tillage systems. **Weed Science**, Ithaca, v.46, p.494-500, 1998.
- RODRIGUES, B.N.; ALMEIDA, F.S. **Guia de herbicidas**. 6. ed. Londrina: Edição dos Autores, 2011. 697p
- SANTOS. J.B. et al. Fitorremediação de áreas contaminadas por herbicidas. In: SILVA, A.A.; SILVA, J.F. **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 2007. p. 249-278.
- SILVA. A.A. et al. Herbicidas: comportamento no solo. In: SILVA, A.A.; SILVA, J.F. **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 2007. p.189-248.
- TOMLIN, C. D. S. **The pesticide manual: A world compendium**. 15th. ed. Croydon: British Crop Protection Council, 2011. 1457p.

IMPACTO DO SULFENTRAZONE NA BIOMASSA MICROBIANA E NA ATIVIDADE DA MICROBIOTA DO SOLO

RESUMO: A utilização de herbicidas de longo período residual nos cultivos pode levar à ocorrência da contaminação do solo e da água. Uma das técnicas alternativas que minimizam esse problema consiste no cultivo de espécies vegetais que interagem com a microbiota do solo, acelerando a degradação do agrotóxico no ambiente. Os microrganismos podem utilizar as moléculas do contaminante como fonte de energia ou em cometabolismo. Neste trabalho, avaliou-se o impacto do herbicida sulfentrazone na biomassa microbiana e na atividade desta no solo com e sem o cultivo de *Canavalia ensiformis* como espécie remediadora. Amostras de solo foram coletadas em um experimento de campo, onde os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 2x2 (aplicação ou não do sulfentrazone associada ou não ao cultivo de *C. ensiformis*), em blocos casualizados com quatro repetições. As amostras do solo para as determinações no laboratório, referentes à evolução do C-CO₂ e ao carbono da biomassa microbiana, foram coletadas aos 15 e 70 dias após o plantio da espécie remediadora. Os valores observados da evolução de CO₂, bem como do carbono da biomassa microbiana, variaram nas amostras de solo coletadas na área onde foi cultivada *C. ensiformis*. O quociente metabólico (qCO₂) foi menor nos tratamentos com aplicação do sulfentrazone e com o cultivo da planta remediadora. Isso indica que o cultivo de *C. ensiformis* em áreas contaminadas com sulfentrazone reduz o efeito prejudicial do herbicida na atividade da microbiota do solo, de tal modo que é aumentado o equilíbrio do sistema.

Palavras-chave: *Canavalia ensiformis*, fitorremediação, efeito residual, respirometria.

ABSTRACT: The uses of long residual period herbicides on crops can lead to soil and water contamination occurrence. One of the alternative techniques that minimize this problem is the plants cultivation that interact with soil microbes, accelerating the degradation of pesticides in the environment. The microorganisms can use the dopant molecules for energy or cometabolismo. In this work the impact of sulfentrazone on microbial biomass and activity in the same soil with and without *Canavalia ensiformis* cultivation, as remedial species. Soil samples were collected in a field experiment in which the treatments were arranged in a 2x2 factorial design (whether or not the associated sulfentrazone or not to *C. ensiformis* cultivation), in a randomized block design with four replications. Soil samples for determinations in the laboratory,

concerning the evolution of the C-CO₂ and microbial biomass carbon, were collected at 15 and 70 days after remedial species planting. Values observed of CO₂ evolution, as well as microbial biomass carbon varied in soil samples collected in the area where it was grown *C. ensiformis*. The metabolic quotient (qCO₂) was lower with sulfentrazone application and with remedial plan cultivation. This indicates that the cultivation of *C. ensiformis* in areas contaminated with sulfentrazone reduces the detrimental effect of the herbicide in soil microbial activity such that it increased the system balance.

Keywords: *Canavalia ensiformis*, phytoremediation, residual effect, respirometry.

INTRODUÇÃO

O controle químico de plantas daninhas é prática comum na atividade agropecuária e consiste em importante tecnologia na redução dos custos de produção e, principalmente, por viabilizar o cultivo em áreas extensas. Todavia, a aplicação de herbicidas que apresentam longa persistência no ambiente pode resultar em altos níveis de toxicidade aos cultivos em sucessão, além da possibilidade de contaminação de águas superficiais e subterrâneas (MANCUSO et al., 2011). Para evitar esse problema, é importante optar pela utilização de herbicidas de curta persistência no ambiente. Contudo, isso nem sempre é possível, pela falta de compostos disponíveis no mercado seletivos às culturas de interesse ou com eficácia comprovada no controle das plantas daninhas, ou pela necessidade de fazer várias aplicações em uma cultura na mesma safra, o que encontra resistência por parte dos produtores.

Como consequência da elevada utilização de herbicidas de maior período residual no solo em culturas como cana-de-açúcar, pastagens, soja, algodão e frutíferas, podem ocorrer grandes extensões de áreas contaminadas. Nesse caso, o uso de plantas remediadoras para acelerar a degradação dos herbicidas surge como alternativa de grande importância (PIRES et al., 2003). A fitorremediação é uma alternativa ambientalmente aceita para a despoluição do solo e da água contaminados por compostos orgânicos e inorgânicos. Várias pesquisas, tanto no Brasil quanto em outros países, têm demonstrado a efetividade dessa técnica na descontaminação de ambientes (MADALÃO et al., 2012a, b; MITTER et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2014; MITTON et al., 2014).

As espécies vegetais usadas em programas de fitorremediação devem apresentar boa tolerância ao herbicida em questão. Essa tolerância pode ser resultante de processos

como a translocação diferencial para outros tecidos do vegetal, havendo subsequente volatilização e/ou degradação parcial ou completa transformação em compostos menos tóxicos (ZHU et al., 2014).

Para essa técnica ser efetiva, é necessário que o herbicida não afete negativamente a atividade da microbiota do solo, associada à espécie remediadora. A interação entre a raiz e o solo promove a proliferação da comunidade microbiana na região da rizosfera, pela exsudação de aminoácidos e polissacarídeos pela planta (YOUSAF et al., 2011; KHAN et al., 2013; AFZAL et al., 2014), o que confere à rizosfera grande potencial na degradação de agrotóxicos.

Entre os herbicidas que apresentam longa persistência no solo e são muito utilizados no Brasil, destaca-se o sulfentrazone (VIVIAN et al., 2006; BLANCO et al., 2010). Esse herbicida, derivado das triazolinonas, inibe a enzima protoporfirinogênio oxidase, causando disfunção na síntese de clorofila, com acúmulo de protoporfirina IX no citoplasma, aparecimento de oxigênio singlete e consequente peroxidação dos ácidos graxos insaturados da plasmalema (SILVA et al., 2007).

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, empregando-se beterraba como planta bioindicadora (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). Além de persistente, o sulfentrazone é classificado como móvel e tem alto potencial de lixiviação tanto vertical (águas subterrâneas) quanto horizontal (PARAÍBA et al., 2003; MARTINEZ et al., 2008).

Considerando que esse herbicida é amplamente utilizado no País e a sua elevada persistência no solo, o sulfentrazone pode constituir-se em fonte de contaminação de aquíferos, como consequência de várias aplicações ao longo do tempo no mesmo local. Diante disso, é necessário o desenvolvimento de técnicas que reduzam a persistência desse agrotóxico no solo, promovendo sua descontaminação. Acredita-se que com o cultivo de espécies de capacidade remediadora de solos contaminados com agrotóxicos seja possível a introdução posterior de culturas sensíveis sem prejuízos econômicos, além do benefício ambiental.

A decomposição microbiana é a via mais importante de degradação do sulfentrazone; associada ao cultivo de leguminosas, ela pode estimular a atividade dos microrganismos, aumentando o potencial de descontaminação de solos contaminados

com esse composto (RODRIGUES; ALMEIDA, 2011). Considerando as boas características agronômicas de *C. ensiformis*, avaliou-se neste trabalho o impacto do sulfentrazone sobre a biomassa e a atividade microbiana do solo, com e sem cultivo dessa espécie, visando utilizá-la como espécie remediadora de solo contaminado por esse herbicida.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido em um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura franco-argiloarenosa, no campo experimental Diogo Alves de Melo, localizado a 20° 46' S e 42° 52' W, com altitude de 650 m. O clima da região é subtropical úmido com inverno seco e verão quente, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger. A temperatura média anual é de 21°C, com precipitação pluvial média anual de 1.200 mm. Os dados climáticos coletados na área experimental durante a realização da pesquisa estão apresentados na Figura 1.

Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 2x2 (tratamento com ou sem aplicação do herbicida sulfentrazone, associado ou não ao cultivo da espécie remediadora *C. ensiformis*), no delineamento de blocos casualizados com quatro repetições.

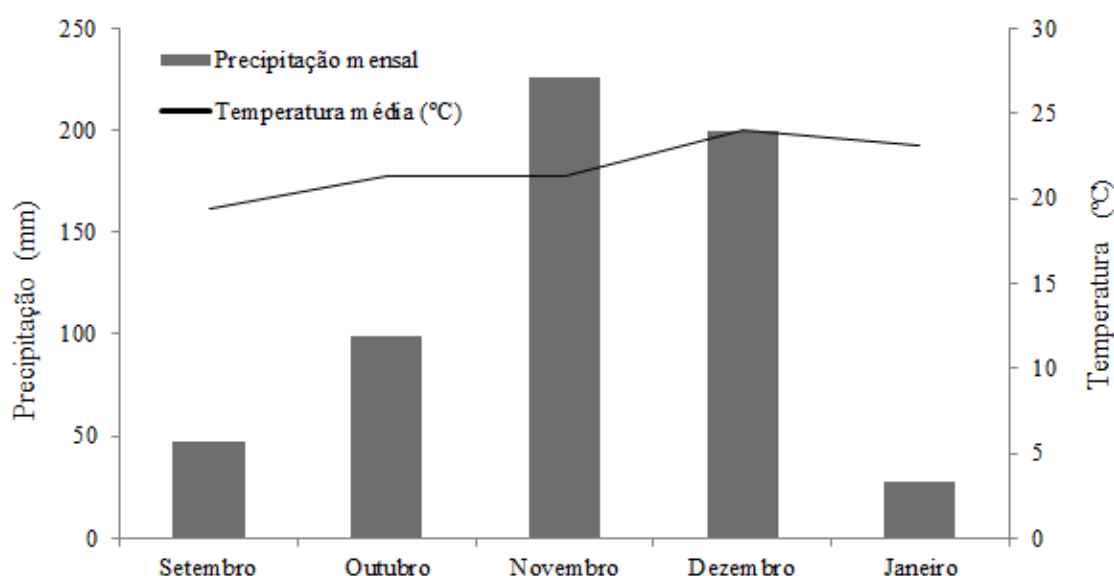


Figura 1 - Precipitação pluvial e temperaturas médias mensais durante o período de condução do experimento (setembro de 2012 a maio de 2013). Fonte: Estação Meteorológica do Departamento de Engenharia Agrícola - UFV.

O solo foi arado e gradeado, sendo caracterizado química e fisicamente (Tabela 1). O sulfentrazone foi aplicado em pré-plantio na dose de 1.000 g ha⁻¹, utilizando-se pulverizador pressurizado a CO₂, munido de pontas TT 110.02, regulado para aplicar volume de calda de 150 L ha⁻¹. As condições climáticas, durante a aplicação, foram: temperatura do ar média de 15,7°C, umidade relativa do ar média de 86% e velocidade do vento de 5,76 km h⁻¹. Decorridos 30 dias após a aplicação, foi realizada a semeadura da espécie remediadora feijão-de-porco (*C. ensiformis*), na densidade de 140 mil plantas ha⁻¹. Cada parcela experimental foi composta por 3,0 m de largura por 6,0 m de comprimento. A área útil de cada parcela correspondeu às quatro linhas centrais, ocupando 2 m de largura e 4 m de comprimento, perfazendo um total de 8 m².

Tabela 1 - Atributos físicos e químicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo da camada arável (0-20 cm) da área experimental

Análise Granulométrica (dag kg ⁻¹)												
Areia Grossa	Aria Fina	Silte	Argila	Classificação Textural								
32	16	19	33	Franco Argilo-Arenoso								
Análise Química												
pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al	Al ³⁺	SB	T	t	V	m	MO
H ₂ O	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³							%	dag kg ⁻¹	
6,51	17,1	104	4,12	0,87	2,1	0,0	5,26	7,36	5,26	71,5	0,0	4,06

pH em água; P - K - Extrator Mehlich 1; Ca - Mg - Al - Extrator: KCl - 1 mol/L; H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0; SB - Soma de Bases Trocáveis; T - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; t - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; V - Saturação por Bases; m - Saturação por alumínio.

Aos 15 e 70 dias após o plantio de *C. ensiformis*, foram coletadas amostras de solo de 0-20 cm nas parcelas experimentais, as quais foram conduzidas até o Laboratório de Herbicida do Solo (Departamento de Fitotecnia - UFV), para incubação e avaliação da evolução de C-CO₂ e biomassa microbiana.

Na quantificação da taxa respiratória da microbiota do solo foi utilizado o método respirométrico de avaliação do C-CO₂ evoluído do solo, no qual amostras de 100 g de solo úmido (60% da capacidade de campo) foram incubadas durante 15 dias em frascos hermeticamente fechados. O C-CO₂ liberado do solo foi carreado por fluxo contínuo de ar (isento de CO₂) até outro frasco contendo 100 mL de solução de NaOH 0,5 mol L⁻¹.

O C-CO₂ evoluído foi estimado a partir da titulação de 10 mL da solução de NaOH com solução de HCl 0,5 mol L⁻¹, acrescidos de três gotas do indicador fenolftaleína (JENKINSON; POWLSON, 1976).

Após 15 dias de incubação, o solo foi retirado dos frascos, tomando-se 18 g para determinação do carbono da biomassa microbiana (CBM). Foi adotado o método descrito por Vance et al. (1987), modificado por Islam e Weil (1998).

O quociente metabólico (qCO₂) foi calculado dividindo-se o C-CO₂ evoluído do solo pelo CBM determinado no solo. Os dados foram submetidos à análise de variância a 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aos 15 dias após o plantio (DAP) de *C. ensiformis*, houve maior desprendimento de C-CO₂, ou seja, houve maior respiração microbiana com o cultivo da planta remediadora na presença e na ausência do sulfentrazone (3.570,00 e 3.997,50 µg C-CO₂, respectivamente). Esse fato pode estar relacionado à maior colonização de microrganismos nesse ambiente pelo efeito rizosférico das plantas de *C. ensiformis* (Tabela 2). Resultado semelhante foi obtido por Pires et al. (2005), no qual *C. ensiformis* destacou-se entre outras leguminosas fitorremediadoras, indicando possível efeito de fitoestimulação do herbicida tebuthiuron.

De acordo com Moreira e Siqueira (2006), o ambiente rizosférico é importante na liberação de exsudatos pelas plantas, auxiliando na proliferação de microrganismos responsáveis pela degradação do contaminante. Assim, ocorre o estímulo à atividade microbiana, promovido pela liberação de substâncias que atuam degradando o herbicida no solo, o que caracteriza, em algumas plantas, a aptidão rizosférica na remediação desses compostos.

Aos 70 DAP, verificou-se menor desprendimento de C-CO₂ no solo cultivado com a planta remediadora e com aplicação do sulfentrazone (Tabela 2). A redução da taxa respiratória do solo pode significar que nesse ambiente há menores distúrbios à atividade microbiana (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Na presença do herbicida, a evolução de C-CO₂ foi afetada negativamente, com ou sem o cultivo de *C. ensiformis*. Aos 15 DAP da espécie remediadora, houve maior desprendimento de C-CO₂ nos solos tratados com sulfentrazone; possivelmente, isso ocorreu porque o tempo de cultivo

ainda não havia sido suficiente para minimizar os distúrbios causados pelo herbicida, tempo esse suficiente aos 70 DAP.

Vários fatores contribuem para mudanças no metabolismo microbiano, entre os quais podem-se citar a degradação de compostos que podem ser usados como fonte de energia, o cometabolismo ou até a intoxicação do agrotóxico aos microrganismos, que levam à menor eficiência de utilização do carbono, promovendo aumento na emissão de C-CO₂ (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Tabela 2 - C-CO₂ evoluído após 15 dias de incubação em amostras de um Argissolo Vermelho-Amarelo coletadas aos 15 e 70 dias após o plantio (DAP) em áreas com ou sem aplicação do sulfentrazone, cultivadas ou não com *C. ensiformis*

C-CO ₂ evoluído [$\mu\text{g C-CO}_2 \text{ (g solo)}^{-1}$]		
Planta remediadora	Sulfentrazone	
	solo tratado	solo não tratado
15 DAP		
sem cultivo	2.630,00 bA*	1.937,50 bA
<i>C. ensiformis</i>	3.570,00 aA	3.997,50 aA
CV (%)	15,5	
70 DAP		
sem cultivo	1.705,00 aB	2.356,50 aA
<i>C. ensiformis</i>	805,00 bB	2.162,50 aA
CV (%)	9,71	

*Médias seguidas por mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste F a 5% de probabilidade.

Os efeitos negativos das práticas agrícolas efetivadas no campo sobre a microbiota podem ser verificados pela variação na biomassa microbiana. Aos 15 DAP, observou-se que a biomassa microbiana foi maior no solo cultivado com *C. ensiformis*, independentemente da presença ou ausência do herbicida (195,52 e 203,42 $\mu\text{g CBM}$) (Tabela 3). Esse fato já era esperado no solo cultivado sem aplicação do sulfentrazone, visto que o ambiente rizosférico estimula a proliferação de microrganismos do solo. Contudo, o impacto do herbicida na comunidade microbiana, mesmo com o cultivo de *C. ensiformis*, poderia resultar em diminuição da biomassa microbiana.

Aos 70 DAP, notou-se que o carbono da biomassa foi menor no solo sem o cultivo da leguminosa e com aplicação do herbicida (150,52 $\mu\text{g CBM}$), em comparação

ao tratamento sem cultivo da leguminosa e sem aplicação do herbicida (213,42 µg CBM) (Tabela 3). Tal fato indica que, quando o herbicida é aplicado no solo, ocorre supressão dos microrganismos. O mesmo não ocorre quando são comparados os tratamentos com cultivo de *C. ensiformis*, com ou sem aplicação do herbicida. Percebeu-se que não há diferença significativa entre eles (Tabela 3). Isso reflete o efeito positivo do ambiente rizosférico para os microrganismos na presença do sulfentrazone.

É provável que a diferença provocada na biomassa microbiana devido à presença do sulfentrazone nas amostras sem cultivo esteja relacionada ao fato de que nesse solo a diversidade dos grupos de microrganismos que condicionam maior capacidade de resiliência está comprometida pela ausência de cultivos (TÓTOLA; CHAER, 2002). Dessa forma, o cultivo de *C. ensiformis* promoveu a liberação de exsudatos na região das raízes, permitindo o crescimento e o desenvolvimento de maior número de grupos de microrganismos.

Vivian et al. (2006) verificaram que o sulfentrazone causou redução da biomassa microbiana do solo. Santos et al. (2010) avaliaram a atividade microbiana rizosférica de *Stizolobium aterrimum*, durante processo de fitorremediação de solo contaminado com o herbicida trifloxysulfuron-sodium, e observaram menor valor de CBM no solo tratado com o herbicida e não cultivado com a espécie fitorremediadora. Em solo cultivado com soja, Vieira et al. (2007) verificaram que o sulfentrazone causou redução da CBM apenas na fase inicial da cultura.

Tabela 3 - Carbono da biomassa microbiana avaliado em amostras de um Argissolo Vermelho-Amarelo coletadas aos 15 e 70 dias após o plantio (DAP) em áreas com ou sem aplicação do sulfentrazone, cultivadas ou não com *C. ensiformis*

Carbono da biomassa microbiana [$\mu\text{g CBM (g solo)}^{-1}$]		
Planta remediadora	Sulfentrazone	
	solo tratado	solo não tratado
15 DAP		
sem cultivo	106,90 bA*	87,82 bA
<i>C. ensiformis</i>	195,52 aA	203,42 aA
CV (%)	17,16	
70 DAP		
sem cultivo	150,52 aB	213,42 aA
<i>C. ensiformis</i>	179,32 aA	200,47 aA
CV (%)	20,21	

*Médias seguidas por mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste F a 5% de probabilidade.

O quociente metabólico ($q\text{CO}_2$) estabelece a relação entre a evolução diária de C-CO_2 e o carbono da biomassa microbiana. Com o aumento da eficiência dessa biomassa em utilizar os recursos disponíveis, menos carbono é perdido como CO_2 pela respiração, podendo este ser incorporado aos tecidos microbianos (ANDERSON; DOMSCH, 1985). Menores valores de $q\text{CO}_2$ significam maior estabilidade da biomassa microbiana, equivalendo a maior estabilidade do sistema. O $q\text{CO}_2$ pode indicar o equilíbrio da microbiota do solo e a magnitude do distúrbio causado por determinada atividade agrícola (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Na Tabela 4, observa-se que o $q\text{CO}_2$ foi elevado nos tratamentos com e sem aplicação de herbicida e sem a presença da planta remediadora, em ambas as avaliações. Esse fato comprova que o cultivo de *C. ensiformis*, nas condições deste estudo, reduziu o efeito prejudicial do herbicida na atividade biológica do solo, caracterizando-se como uma das possíveis razões da capacidade remediadora dessa espécie em solos contaminados pelo sulfentrazone. Os maiores valores de $q\text{CO}_2$ nos tratamentos com aplicação de herbicida e sem espécie remediadora são consequência da maior atividade microbiana, com maior liberação de C-CO_2 por unidade de CBM.

Tabela 4 - Quociente metabólico avaliado em amostras de um Argissolo Vermelho-Amarelo coletadas aos 15 e 70 dias após o plantio (DAP) em áreas com ou sem aplicação do sulfentrazone, cultivadas ou não com *C. ensiformis*

Quociente metabólico (C-CO ₂ CBM ⁻¹ dia ⁻¹)		
Planta remediadora	Sulfentrazone	
	solo tratado	solo não tratado
15 DAP		
sem cultivo	1,69 aA*	1,48 aA
<i>C. ensiformis</i>	1,22 bA	1,33 aA
CV (%)	20,11	
70 DAP		
sem cultivo	0,76 aA	0,75 aA
<i>C. ensiformis</i>	0,31 bB	0,72 aA
CV (%)	17,35	

*Médias seguidas por mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste F a 5% de probabilidade.

Conclui-se que o cultivo de *C. ensiformis* em áreas contaminadas com sulfentrazone reduz o efeito prejudicial desse herbicida na atividade da microbiota do solo. Isso se explica pelo aumento nos valores da CBM e pela redução nos valores do quociente metabólico (qCO₂), indicando maior sustentabilidade do sistema agrícola.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG e ao CNPq, pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, T.H.; DOMSCH, K.H. Determination of ecophysiological maintenance carbon requirements of soil microorganisms in a dormant state. **Biology and Fertility of Soils**, v.1, p.81-89, 1985.

AFZAL, M. et al. Endophytic bacteria: Prospects and applications for the phytoremediation of organic pollutants. **Chemosphere**, v. 117, p.232–242, 2014.

- BLANCO, F.M.G. et al. Persistência do herbicida sulfentrazone em solo cultivado com cana-de-açúcar. **Bragantia**, v.69, p.71-75, 2010.
- 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, p.693-700, 2005.
- ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, v.27, p.408-416, 1998.
- JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil: a method for measuring soil biomass. **Soil Biology & Biochemistry**, v.8, p.209-213, 1976.
- KHAN, S. et al. Plant–bacteria partnerships for the remediation of hydrocarbon contaminated soils. **Chemosphere**, v.90, p.1317–1332, 2013.
- MADALÃO, J.C. et al. Fitorremediação de solos contaminados com o herbicida sulfentrazone por espécies de adubos verdes. **Revista de Ciências Agrárias**, v.55, p.288-296, 2012a.
- MADALÃO, J.C. et al. Uso de leguminosas na fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, p.390-396, 2012b.
- MANCUSO, M.A.C. et al. Efeito residual de herbicidas no solo (“Carryover”). **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.10, p.151-164, 2011.
- MARTINEZ, C.O. et al. Degradation of the herbicide sulfentrazone in a Brazilian Typic Hapludox soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v.40, p.879-888. 2008.
- MITTER, B. et al. 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. et al., Assessment of tolerance and efficiency of crop species in the phytoremediation of DDT polluted soils. **Ecological Engineering**, v.71, p.501–508, 2014.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2.ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2006. 729 p.

- OLIVEIRA, V. et al. Hydrocarbon contamination and plant species determine the phylogenetic and functional diversity of endophytic degrading bacteria. **Molecular Ecology**. v.23, p.1392–1404, 2014.
- PARAÍBA, L.C. et al. Evaluation of soil temperature effect on the herbicide leaching potential into groundwater in the brazilian cerrado. **Chemosphere**, v.53, p.1087-1095, 2003.
- PIRES, F. R. et al. Fitorremediação de solos contaminados com tebuthiuron utilizando-se espécies cultivadas para adubação verde. *Planta Daninha*, v. 23, p.711-717, 2005.
- PIRES, F.R. et al. Fitorremediação de solos contaminados por herbicidas. **Planta Daninha**, v.21, p.335-341, 2003.
- RODRIGUES, B.N.; ALMEIDA, F.S. **Guia de herbicidas**. 6. ed. Londrina: Edição dos Autores, 2011. 697p
- SANTOS, E.A. et al. Atividade rizosférica de solo tratado com herbicida durante processo de remediação por *Stizolobium aterrimum*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.40, p.1-7, 2010.
- SILVA, A.A. et al. Herbicidas: classificação e mecanismos de ação. In: SILVA, A.A.; SILVA, J.F. **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 2007. p. 83-148.
- TÓTOLA, M.R.; CHAER, G.M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: ALVAREZ V.,V.H. et al. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**.Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2. p.195-276.
- VANCE, E.D. et al. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology & Biochemistry**, v.19, p.703-707, 1987.
- VIEIRA, R. F. et al. Soil microbial biomass C and symbiotic processes associated with soybean after sulfentrazone herbicide application. **Plant Soil**, v.300, p.95-103, 2007.
- VIVIAN, R. et al. Persistência de sulfentrazone em argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v.24, p.741-750, 2006.

ZHU, X. et al. Application of endophytic bacteria to reduce persistent organic pollutants contamination in plants. **Clean-Soil Air Water**, v.42, p.306–310, 2014.

YOUSAF, S. et al. Hydrocarbon degradation, plant colonization and gene expression of alkane degradation genes by endophytic *Enterobacter ludwigii* strains. **Environmental Pollution**. v.159, p.2675–2683, 2011.

ACÇÃO DA *Canavalia ensiformis* NA REMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM SULFENTRAZONE

RESUMO: Com o objetivo de controlar plantas daninhas em culturas que apresentam longo período crítico de prevenção da interferência, desenvolveram-se herbicidas de longa persistência no ambiente. Quando utilizados sem o conhecimento prévio de suas interações com o solo, esses herbicidas podem inviabilizar o cultivo em sucessão de outras culturas sensíveis e contaminar águas superficiais e subterrâneas. Na busca de alternativas para solução desse problema, têm-se realizado estudos utilizando o cultivo de espécies vegetais que sejam capazes de acelerar o processo de descontaminação dos solos por esses herbicidas. Nesta pesquisa, foi avaliado o potencial do feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) como remediador do sulfentrazone no solo. Para comprovar a eficiência dessa espécie em remediar solos contaminados com o sulfentrazone, utilizou-se o sorgo (*Sorghum bicolor*) como bioindicador. O experimento foi realizado em condições de campo no delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 2x3. Os tratamentos se constituíram de solo tratado ou não com o herbicida, associado a três manejos de *C. ensiformis*: ausência de cultivo, cultivo e incorporação ao solo dessa espécie por ocasião de seu florescimento e cultivo, com retirada da parte aérea das parcelas dessas plantas após a roçada. Após esse processo, foi cultivado o sorgo nas parcelas referentes a cada tratamento. Aos 20, 40 e 60 dias após o plantio do sorgo, foi avaliada a altura das plantas, e aos 120 dias depois do plantio, determinaram-se a matéria seca, o número de plantas e a produtividade do sorgo. O cultivo do sorgo em sucessão a *C. ensiformis* cultivada em áreas contaminadas com o sulfentrazone proporcionou produção de matéria seca, número de plantas, produtividade e altura de plantas de sorgo equivalentes aos do cultivo em área não contaminada. Concluiu-se que o cultivo do feijão-de-porco é eficiente na remediação do sulfentrazone no solo. A retirada ou não dos restos culturais de *C. ensiformis* não altera a eficiência dessa espécie para remediar solos contaminados por esse herbicida.

Palavras-chave: biorremediação, descontaminação do solo, herbicidas.

ABSTRACT: In order to control weeds in culture that have long critical interference period were developed long persistence herbicides in the environment. These when used without prior knowledge of their interactions with soil can derail cultivation in succession to other sensitive crops and contaminate surface and groundwater. In the

search for alternative solution to this problem has been conducted studies using the plants cultivation which are able to accelerate soil decontamination process by these herbicides. In this study we evaluated Jack Bean (*Canavalia ensiformis*) potential as remedial sulfentrazone in soil. To prove this specie efficiency to remediating soils contaminated with sulfentrazone, it has been used the sorghum (*Sorghum bicolor*) as bioindicator. The experiment was conducted under field conditions in a randomized block design in a 2x3 factorial. The treatments consisted of whether or not with the herbicide soil, associated with three *C. ensiformis* managements: cultivation absence, *C. ensiformis* cultivation and soil amendment at the time of its flowering and growing with area part removal of these plots plants after mowing. After this process was grown sorghum in the plots for each treatment. At 20, 40 and 60 days after planting sorghum was evaluated plant height and 120 days after planting, it was determined the dry matter, plants number and sorghum productivity. The sorghum crop in succession to *C. ensiformis* cultivated in areas contaminated with sulfentrazone provided dry matter production, plants numbers, productivity and height in sorghum cultivation equivalent to uncontaminated area. We conclude that the cultivation of Jack Bean is effective in the sulfentrazone remediation in the soil. The *C. ensiformis* cultural remains removal or not does not change the efficiency of this specie to remedy soils contaminated by this herbicide.

Keywords: bioremediation, soil decontamination, herbicides.

INTRODUÇÃO

Herbicidas que persistem por longos períodos no solo têm sua importância para garantir a produtividade das plantas cultivadas, especialmente naquelas que apresentam longo período total de prevenção da interferência das plantas daninhas (PTPI). No entanto, ao término do PTPI, que normalmente acontece simultaneamente com o fechamento do dossel da cultura, a presença do herbicida no solo pode ser indesejável (BELO et al., 2007; DAN et al., 2011), podendo contaminar mananciais de águas subterrâneas, por lixiviação, e/ou superficiais, por escoamento superficial (KRUTZ et al., 2005), além da toxicidade a organismos não alvo (BOUTIN et al., 2012; LARRAS et al., 2013).

Visando à diminuição dos problemas ocasionados pelo uso de herbicidas com longa persistência no ambiente, tem sido proposto o cultivo de plantas que podem

acelerar a degradação dos herbicidas no ambiente. Vários trabalhos já comprovaram que essa técnica é eficiente na despoluição do solo, em diversos ecossistemas contaminados com compostos orgânicos e inorgânicos (MITTER et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2014; MITTON et al., 2014). No entanto, estudos em solos tropicais ainda são incipientes e requerem ações envolvendo identificação de espécies capazes de se associarem a microrganismos, atuando em programas de fitorremediação, à semelhança do que já é realizado em outros países (MERINI et al., 2009; WARSAW et al., 2012; IBRAHIM et al., 2013).

Entre os herbicidas que apresentam longa persistência no solo e são muito utilizados no Brasil, destaca-se o sulfentrazone (VIVIAN et al., 2006; BLANCO et al., 2010). Esse herbicida é muito usado no controle de plantas daninhas em culturas de cana-de-açúcar e soja e, também, em áreas de reflorestamento (PASSOS, 2011). Diversos estudos referentes à persistência (BLANCO; VELINI, 2005; BLANCO et al., 2010), sorção e lixiviação (MONQUERO et al., 2010; PASSOS et al., 2013) desse herbicida em solos brasileiros têm evidenciado o potencial de intoxicação de culturas sucessoras, como também da contaminação de águas superficiais e subterrâneas. Diante disso, faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas que reduzam a persistência desse composto no solo, promovendo sua descontaminação. Estudos realizados por Madalão et al. (2012a, b, 2013) identificaram o feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) como uma das espécies eficientes na remediação do herbicida sulfentrazone em condições controladas.

Além do emprego de plantas, a descontaminação ambiental de agrotóxicos é auxiliada pela microbiota do solo, bem como por práticas agronômicas que, se aplicadas em conjunto, removem, imobilizam ou tornam os contaminantes inofensivos ao ecossistema (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000). Apesar de comprovada a eficiência do feijão-de-porco na remediação do sulfentrazone, ainda são escassas as informações sobre os efeitos do manejo dos resíduos dessa espécie no processo de remediação do solo contaminado.

Acredita-se que o cultivo de algumas espécies com capacidade remediadora em solos contaminados com agrotóxicos, além do benefício ambiental, possibilite introduzir culturas que venham a garantir a viabilidade econômica do sistema agrícola, podendo contribuir para melhorar a fertilidade do solo. Nesta pesquisa, objetivou-se avaliar o potencial de *C. ensiformis*, bem como o efeito de seu manejo, sobre a eficácia da

fitorremediação de um solo contaminado com sulfentrazone em campo, pela técnica do bioensaio.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado durante o período de setembro de 2012 a maio de 2013 em um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura franco-argiloarenosa, no campo experimental Diogo Alves de Melo, localizado a 20° 46' S e 42° 52' W, com altitude de 650 m; a área onde foi conduzido o experimento nunca havia sido cultivada anteriormente. O clima da região é subtropical úmido com inverno seco e verão quente, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger. A temperatura média anual é de 21°C, e a precipitação pluvial média anual, de 1.200 mm. Os dados climáticos coletados na área experimental durante a realização da pesquisa estão apresentados na Figura 1, e na Tabela 1 encontra-se a análise química e granulométrica do solo.

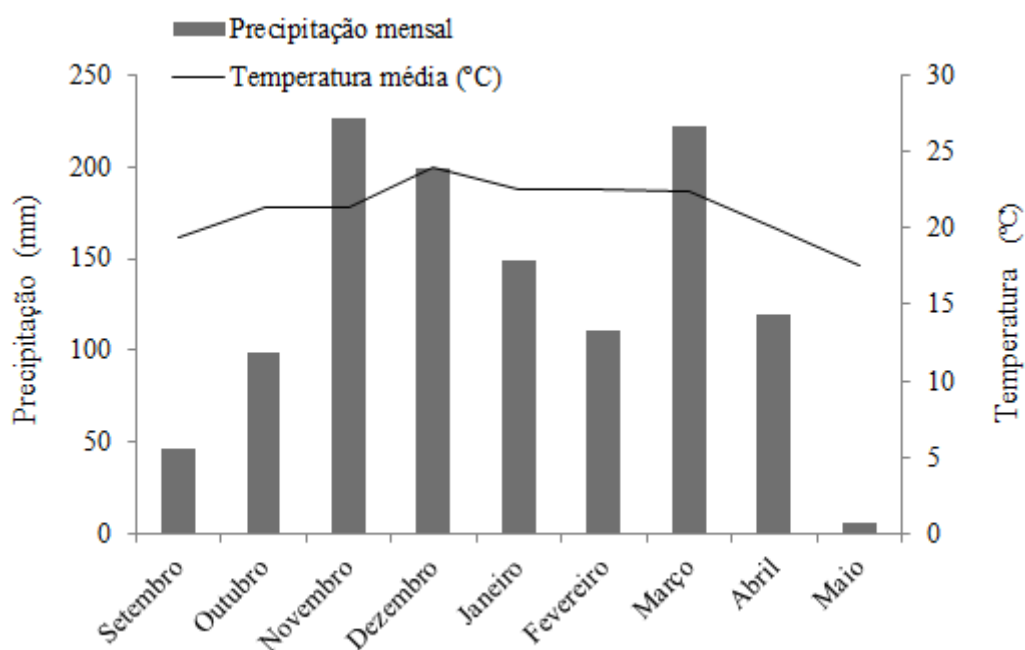


Figura 1 - Precipitação pluvial e temperaturas médias mensais durante o período de condução do experimento (setembro de 2012 a maio de 2013). Fonte: Estação Meteorológica do Departamento de Engenharia Agrícola - UFV.

Tabela 1 - Atributos físicos e químicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo da camada arável (0-20 cm) da área experimental

Análise Granulométrica (dag kg ⁻¹)												
Areia Grossa	Aria Fina	Silte	Argila	Classificação Textural								
32	16	19	33	Franco Argilo-Arenoso								
Análise Química												
pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al	Al ³⁺	SB	T	T	V	m	MO
H ₂ O	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³							%	dag kg ⁻¹	
6,51	17,1	104	4,12	0,87	2,1	0,0	5,26	7,36	5,26	71,5	0,0	4,06

pH em água; P - K - Extrator Mehlich 1; Ca - Mg - Al - Extrator: KCl - 1 mol/L; H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0; SB - Soma de Bases Trocáveis; T - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; t - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; V - Saturação por Bases; m - Saturação por alumínio.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com quatro repetições. Os tratamentos foram arrançados em esquema fatorial 2x3, sendo o primeiro fator correspondente à aplicação ou não do sulfentrazone, e o segundo, aos manejos da espécie fitorremediadora: ausência de cultivo, cultivo do feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e incorporação ao solo das plantas por ocasião de seu florescimento, utilizando-se enxada rotativa e cultivo do feijão-de-porco, e retirada da parte aérea das parcelas.

Cada parcela experimental era composta por 3,0 m de largura por 6,0 m de comprimento. A área útil de cada parcela correspondeu às quatro linhas centrais, ocupando 2 m de largura e 4 m de comprimento, perfazendo um total de 8 m². O sulfentrazone foi aplicado em pré-plantio na dose de 1.000 g ha⁻¹, utilizando-se pulverizador pressurizado com CO₂ e bico TT 110.02, com volume de calda de 150 L ha⁻¹. As condições climáticas, durante a aplicação, foram: temperatura do ar média de 15,7 °C, umidade relativa do ar média de 86% e velocidade do vento de 5,76 km h⁻¹. Decorridos 30 dias da aplicação, foi realizada a semeadura manual da espécie remediadora feijão-de-porco (*C. ensiformis*), na densidade de 140 mil plantas ha⁻¹ e no espaçamento de 0,5 m entre linhas.

Aos 75 dias após a semeadura da espécie remediadora, em seu pleno florescimento, foi realizada dessecação dessas plantas, utilizando-se a mistura de

glyphosate (1.080 g ha⁻¹) + 2,4-D (335 g ha⁻¹). Após dez dias da dessecação, a massa da matéria seca das plantas remediadoras foi manejada conforme os tratamentos propostos.

A semeadura da espécie bioindicadora (*S. bicolor*) foi feita de forma mecanizada no espaçamento de 0,50 m entre linhas, com população de 120.000 plantas ha⁻¹, cinco dias após o manejo da matéria seca de *C. ensiformis*. Foi feita a adubação de plantio utilizando-se 12, 42 e 24 kg ha⁻¹ de N, P e K, respectivamente. A escolha de *S. bicolor* como espécie indicadora dos resíduos do sulfentrazone no solo foi baseada em diversas pesquisas (ROSSI et al., 2003; VIVIAN et al., 2006; DAN et al., 2011; BELO et al., 2011) que comprovaram a alta sensibilidade dessa espécie ao sulfentrazone.

Foi avaliada a altura das plantas de sorgo (cinco plantas) aos 20, 40 e 60 DAP. Aos 120 DAP, foram determinados a produção de matéria seca, colhendo-se cinco plantas por parcela e secando-as em estufa de circulação forçada a 72 °C até peso constante, e o número de plantas ha⁻¹, além da produtividade do sorgo, colhendo-se duas linhas de 3 m por parcela. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, e as médias, comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aos 20 DAP, a altura das plantas de sorgo não foi alterada pelos manejos do feijão-de-porco quando na presença do sulfentrazone (Tabela 2). No entanto, em solos não contaminados com o herbicida, o cultivo da espécie remediadora e a posterior retirada dos restos culturais aumentaram a altura do sorgo em relação à ausência de cultivo. Na comparação entre os sistemas de manejo com e sem herbicida, observou-se apenas diferença no cultivo da planta remediadora com a retirada dos restos culturais, e na ausência a altura foi maior.

Tabela 2 - Altura (cm) de plantas de sorgo cultivado em solo contaminado ou não com sulfentrazone, sob diferentes manejos da espécie remediadora (*C. ensiformis*)

Manejo da planta remediadora	Sulfentrazone	
	solo tratado	solo não tratado
20 DAP		
Sem cultivo	20,27 aA*	19,85 bA
Cultivada e incorporada ao solo	23,52 aA	23,02 abA
Cultivada e retirada da área	20,75 aB	23,77 aA
CV (%)	8,67	
40 DAP		
Sem cultivo	77,83 bA	86,08 bA
Cultivada e incorporada ao solo	95,50 aA	93,41 bA
Cultivada e retirada da área	91,83 aB	109,33 aA
CV (%)	6,57	
60 DAP		
Sem cultivo	150,54 aA	162,15 aA
Cultivada e incorporada ao solo	164,65 aA	174,10 aA
Cultivada e retirada da área	171,35 aA	175,65 aA
CV (%)	7,63	

*Médias seguidas por mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Aos 40 DAP, comparando a altura de plantas de sorgo no solo contaminado com o sulfentrazone, observou-se maior crescimento onde foi realizado o cultivo do feijão-de-porco, independentemente da retirada ou não da parte aérea de *C. ensiformis* (Tabela 2). Na ausência do herbicida, o cultivo da bioindicadora com posterior retirada da parte aérea promoveu maior crescimento do sorgo. No entanto, aos 60 DAP, não foram constatadas diferenças na altura das plantas entre os diferentes tratamentos.

Com a adubação verde, o material orgânico produzido pode fornecer ao solo elevados teores de nutrientes, permitindo aumento da capacidade de troca catiônica (CTC), da infiltração e da retenção de água no solo, favorecendo também as condições para o desenvolvimento de microrganismos benéficos (COSTA et al., 2004; JARAMILLO-BOTERO et al., 2008; TEODORO et al., 2011). Possivelmente, esse efeito causado pelo feijão-de-porco favoreceu o sorgo, proporcionando maior crescimento inicial, apresentado nos locais pré-cultivados com a leguminosa. O

crescimento inicial rápido é importante, pois permite fechamento rápido do dossel da cultura, fazendo com que esta sobressaia em relação às plantas daninhas na competição por água, luz e nutrientes (GUSTAFSON et al., 2004).

Menor acúmulo de matéria seca da parte aérea do sorgo foi observado quando este foi cultivado em solo contaminado com o sulfentrazone e sem fitorremediação com *C. ensiformis* (Tabela 3). Na mesma condição, a incorporação ou não dos restos culturais da fitorremediadora não interferiu na variável. Na ausência do herbicida, não se observou diferença entre os manejos da espécie remediadora. Segundo Pires et al. (2005), em um programa de fitorremediação de herbicidas utilizando espécies leguminosas, espera-se obter duplo benefício para o ambiente: a remediação do solo contaminado pelo herbicida e a melhoria da fertilidade do solo proporcionada pela adubação verde. Dessa maneira, o sorgo pode ter sido beneficiado pelo pré-cultivo do feijão-de-porco, conforme observado por Heinrichs et al. (2005) no milho, cultivado em consórcio com essa espécie.

Tabela 3 - Matéria seca (g) da parte aérea de plantas de sorgo cultivado em solo contaminado ou não com sulfentrazone, sob diferentes manejos da espécie remediadora (*C. ensiformis*)

Manejo da planta remediadora	Sulfentrazone	
	solo contaminado	solo não contaminado
Sem cultivo	349,81 bA*	424,35 aA
Cultivada e incorporada ao solo	484,19 aA	468,41 aA
Cultivada e retirada da área	506,82 aA	433,12 aA
CV (%)	15,61	

*Médias seguidas por mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O sulfentrazone reduziu o estande de plantas de sorgo semeadas nas parcelas sem cultivo de *C. ensiformis* em relação ao controle (sem herbicida e sem *C. ensiformis*) e ao manejo da remediadora – com cultivo e incorporada ou retirada da área (Tabela 4). Percebe-se, também, que nos tratamentos sem fitorremediação, o número de plantas nas parcelas não tratadas com o herbicida foi superior ao do tratamento que continha resíduo no solo. Essa informação confirma o efeito prejudicial do sulfentrazone no solo, evidenciado pela cultura do sorgo, o qual não é tolerante a esse herbicida.

Tabela 4 - Número de plantas por hectare de sorgo cultivado em solo contaminado ou não com sulfentrazone, sob diferentes manejos da espécie remediadora (*C. ensiformis*)

Manejo da planta remediadora	Sulfentrazone	
	solo contaminado	solo não contaminado
Sem cultivo	60000,00 bB*	78750,00 aA
Cultivada e incorporada ao solo	97916,66 aA	93333,33 aA
Cultivada e retirada da área	94166,67 aA	89750,00 aA
CV (%)	12,27	

*Médias seguidas por mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Esses resultados indicam que o solo foi remediado também em condições de campo, onde os fatores são adversos, como regime de chuvas, ataque de pragas, ventos, entre outros. Essa evidência é importante, pois indica que a planta remediadora reduz o período em que o herbicida permanece disponível no solo. Isso permite a liberação da área em menor período, para o cultivo de espécies que apresentam alta sensibilidade ao herbicida em questão. Além disso, resulta em menor risco de contaminação do lençol freático e de esse composto ser carregado por erosão para outras áreas não contaminadas ou cursos d'água.

Santos et al. (2004) e Procópio et al. (2005) avaliaram o potencial de diversas espécies para descontaminar solos tratados com herbicidas. Esses autores concluíram que *C. ensiformis* é uma das espécies eficientes na remediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. Pires et al. (2005, 2006) selecionaram essa mesma espécie como eficiente na fitorremediação do tebuthiuron. Também Pires et al. (2008) avaliaram a fitorremediação de solo contaminado com diferentes níveis de tebuthiuron, utilizando *Crotalaria juncea* como espécie indicadora da presença desse herbicida. Os autores concluíram que as espécies *C. ensiformis* e *Cajanus cajan* apresentaram os melhores desempenhos, sendo indicadas na remediação de solos contaminados com o tebuthiuron até a dose de 1.000 g ha⁻¹. Todos esses trabalhos evidenciam a versatilidade do feijão-de-porco em fitorremediar diferentes herbicidas de diferentes grupos químicos, reforçando os resultados apresentados neste trabalho.

Na Tabela 5, verifica-se que a produtividade da planta indicadora seguiu a mesma tendência dos dados de número de plantas. Estes resultados comprovam os efeitos benéficos do cultivo do feijão-de-porco mesmo nos tratamentos com aplicação do sulfentrazone. A produtividade nestes locais variou entre 62,86 e 59,19 t ha⁻¹, porém,

onde foi aplicado herbicida e não houve fitorremediação, a produtividade foi de apenas 32,08 t ha⁻¹. Notou-se também que, onde não houve aplicação de herbicida nem cultivo do feijão-de-porco, a produtividade foi superior (47,71 t ha⁻¹) à do local onde foi aplicado herbicida e o solo não foi remediado. Essa informação é importante porque indica que a produtividade superior onde o solo foi fitorremediado não se deve apenas à adubação verde proporcionada pela leguminosa, mas também ao seu efeito remediador.

Tabela 5 - Produtividade de matéria verde do sorgo (t ha⁻¹) cultivado em solo contaminado ou não com sulfentrazone, sob diferentes manejos da espécie remediadora (*C. ensiformis*)

Manejo da planta remediadora	Sulfentrazone	
	solo contaminado	solo não contaminado
Sem cultivo	32,08 bB*	47,71 bA
Cultivada e incorporada ao solo	62,86 aA	65,60 aA
Cultivada e retirada da área	59,19 aA	58,26 abA
CV (%)	15,34	

*Médias seguidas por mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para que um programa de fitorremediação seja viável, é importante que não haja necessidade de retirada da planta remediadora da área remediada, pois isso poderia aumentar os custos do sistema, desestimulando o produtor a adotar a fitorremediação. Com o cultivo da leguminosa, não houve diferença entre os tipos de manejo (planta retirada ou incorporada) ou entre os tratamentos que receberam ou não o herbicida, indicando que o feijão-de-porco absorve e degrada o sulfentrazone ou facilita sua degradação no próprio ambiente rizosférico, não havendo a necessidade de retirar a planta remediadora da área antes de se plantar uma cultura suscetível ao herbicida.

A base da seletividade de herbicidas inibidores da enzima PROTOX em espécies tolerantes pode ser atribuída à absorção e translocação mínimas de herbicida, 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), e à rápida metabolização (VAUGHN; 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.

Além desse mecanismo, de forma adicional, *C. ensiformis* pode ainda promover a remediação pela rizosfera, pois flavonoides e outros compostos liberados pelas raízes podem estimular o crescimento e a atividade de microrganismos degradadores ou, ainda, reagir com o herbicida, imobilizando-o (LEIGH et al., 2002, 2006; CHAUDHRY et al., 2005). Além disso, o crescimento e a morte das raízes promovem a aeração do solo, o que pode aumentar a degradação oxidativa de compostos orgânicos (LEIGH et al., 2002; KUIPER et al., 2004).

Concluiu-se que *C. ensiformis* é capaz de remediar áreas contaminadas com sulfentrazone, independentemente da retirada ou não da parte aérea das plantas das áreas remediadas, proporcionando maior segurança no plantio de espécies sensíveis em áreas onde esse herbicida foi aplicado na cultura anterior. Ademais, o cultivo de *C. ensiformis* em áreas contaminadas com o herbicida, independentemente da retirada ou não das plantas dessa espécie da área após serem dessecadas, resulta em menor risco de impactos ambientais, como a contaminação de cursos d'água, por escoamento superficial, e a contaminação do lençol freático, por lixiviação.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG e ao CNPq, pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, A.M.A.; SIQUEIRA, J.O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R.F. et al. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.299-352.

BELO, A.F. et al. Fitorremediação de solo adubado com composto orgânico e contaminado com trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v.25, p.251-258, 2007.

BELO, A.F. et al. Potencial de espécies vegetais na remediação de solo contaminado com sulfentrazone. **Planta daninha**, v.29, p.821-828, 2011.

BLANCO, F.M.G. et al. Persistência do herbicida sulfentrazone em solo cultivado com cana-de-açúcar. **Bragantia**, v.69, p.71-75, 2010.

- 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, p.693-700, 2005.
- BOUTIN, C. et al. Phytotoxicity testing for herbicide regulation: Shortcomings in relation to biodiversity and ecosystem services in agrarian systems. **Science of The Total Environment**, v.415, p.79–92, 2012.
- CHAUDHRY, Q. et al. Utilizing the synergy between plants and rhizosphere microorganisms to enhance breakdown of organic pollutants in the environment. **Environmental Science and Pollution Research**, v.12, p.34-48, 2005.
- COSTA, G.S. et al. Aporte de nutrientes pela serapilheira em uma área degradada e revegetada com leguminosas arbóreas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.5, 2004.
- DAN, H.A. et al. Residual activity of herbicides used in soybean agriculture on grain sorghum crop succession. **Planta Daninha**, v.28, p.1087-1095, 2011.
- GUSTAFSON, D.J. et al. Competitive relationships of *Andropogon gerardii* (Big Bluestem) from remnant and restored native populations and select cultivated varieties. **Functional Ecology**, v.18, p.451-457, 2004.
- HEINRICHS, R. et al. Características químicas de solo e rendimento de fitomassa de adubos verdes e de grãos de milho, decorrente do cultivo consorciado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.29, p.71-79, 2005.
- HIGGINS, J.M. et al. Absorption, tranlocation, and metabolism of acifluorfen and lactofen in pitted morningglory (*Ipomoea lacunosa*) and ivyleaf morning glory (*Ipomoea hederacea*). **Weed Science**, v.36, p.141-145, 1988.
- IBRAHIM, S.I. et al. Phytoremediation of atrazine-contaminated soil using *Zea mays* (maize). **Annals of Agricultural Science**, v.58, p.69-75, 2013.
- JARAMILLO-BOTERO, C. et al. Produção de serapilheira e aporte de nutrientes de espécies arbóreas nativas em um sistema agroflorestal na zona da mata de minas gerais. **Revista Árvore**, v.32, p.869-877, 2008.
- KRUTZ, L.J. et al. Reducing herbicide runoff from agricultural fields with vegetative filter strips: a review. **Weed Science**, v.53, p.353–367, 2005.

- KUIPER, I. et al. Rhizoremediation: a beneficial plant-microbe interaction. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 17, p.6-15, 2004.
- LARRAS, F. et al. Assessment of toxicity thresholds in aquatic environments: Does benthic growth of diatoms affect their exposure and sensitivity to herbicides? **Science of The Total Environment**. v.463–464, p.469–477, 2013.
- LEIGH, M. B. et al. Polychlorinated biphenyl (PCB)-degrading bacteria associated with trees in a PCBcontaminated site. **Applied and Environmental Microbiology**, v.72, p.2331-2342, 2006.
- LEIGH, M. B. et al. Root turnover: an important source of microbial substrates in rhizosphere remediation of recalcitrant contaminants. **Environmental Science & Technology**, v.36, p.1579-1583, 2002.
- MADALÃO, J.C. et al. Fitorremediação de solos contaminados com o herbicida sulfentrazone por espécies de adubos verdes. **Revista de Ciências Agrárias**, v.55, p.288-296, 2012a.
- MADALÃO, J.C. et al. Susceptibilidade de espécies de plantas com potencial de fitorremediação do herbicida sulfentrazone. **Revista Ceres**, v. 60, p.111-121, 2013.
- MADALÃO, J.C. et al. Uso de leguminosas na fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, p.390-396, 2012b.
- MATSUMOTO, H. et al. Basis for common chickweed (*Stellaria media*) tolerance to oxyfluorfen. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 64, p.47-53, 1999.
- MERINI, L.J. et al. Phytoremediation potential of the novel atrazine tolerant *Lolium multiflorum* and studies on the mechanisms involved. **Environmental Pollution**, v. 157, p.3059–3063, 2009.
- MITTER, B. et al. 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. et al., Assessment of tolerance and efficiency of crop species in the phytoremediation of DDT polluted soils. **Ecological Engineering**. v. 71, p. 501–508, 2014.

- MONQUERO, P.A. et al. Lixiviação e persistência dos herbicidas sulfentrazone e Imazapic. **Planta Daninha**, v.28, p.185-195, 2010.
- OLIVEIRA, V. et al. Hydrocarbon contamination and plant species determine the phylogenetic and functional diversity of endophytic degrading bacteria. **Molecular Ecology**. p.23, v.1392–1404, 2014.
- PASSOS, A.B.R.J. **Sorção, dessorção e lixiviação do sulfentrazone em diferentes solos brasileiros**. 2011. 50 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- PASSOS, A.B.R.J.et al. Sorption and desorption of sulfentrazone in Brazilian soils. **Journal of Environmental Science and Health**, v. 48, p. 646–650, 2013.
- PIRES, F.R. et al. Adubos verdes na fitorremediação de solos contaminados com o herbicida tebuthiuron. **Caatinga**, v.19, p.92-97, 2006.
- PIRES, F.R. et al. Avaliação da fitorremediação de tebuthiuron utilizando *Crotalaria juncea* como planta indicadora. **Revista Ciência Agronômica**, v.39, p.245-250, 2008.
- PIRES, F. R. et al. Fitorremediação de solos contaminados com tebuthiuron utilizando-se espécies cultivadas para adubação verde. **Planta Daninha**, v. 23, p.711-717, 2005.
- PROCÓPIO, S.O. et al. Potencial de espécies vegetais para a remediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v. 23, p.9-16, 2005.
- ROSSI, C.V.S. et al. Mobilidade do sulfentrazone em nitossolo vermelho e em neossolo quartzarênico. **Planta Daninha**, v.21, p.111-120, 2003.
- SANTOS, J.B. et al. Fitorremediação do herbicida trifloxysulfuron sodium. **Planta Daninha**, v.22, p.223-330, 2004.
- TEODORO, R.B. et al. Aspectos agronômicos de leguminosas para adubação verde no Cerrado do Alto Vale do Jequitinhonha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.635-643, 2011.
- 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. et al. 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, p.555-561, 2005.

VIVIAN, R. et al. Persistência de sulfentrazone em Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v.24, p.741-750, 2006.

WARSAW, A.L. et al. Remediation of metalaxyl, trifluralin, and nitrate from nursery runoff using container-grown woody ornamentals and phytoremediation areas. **Ecological Engineering**. v.47, p.254–263, 2012.

SORÇÃO E DESSORÇÃO DO SULFENTRAZONE EM SOLOS CULTIVADOS DO BRASIL

RESUMO: O comportamento de herbicidas no solo é influenciado pelas interações entre suas partículas e os coloides do solo. Dependendo das características físico-químicas do solo e dos herbicidas, estes podem ficar sorvidos aos coloides ou disponíveis na solução do solo, para serem absorvidos pelas plantas e microrganismos, ou ser lixiviados. Desse modo, a eficiência agrônômica de um herbicida, assim como o potencial desses compostos na contaminação de águas superficiais e subterrâneas, depende dessas interações e das condições climáticas. O objetivo deste trabalho foi determinar a sorção e a dessorção do sulfentrazone em diferentes solos cultivados do Brasil (Neossolo Regolítico, Argissolo Vermelho, Cambissolo Húmico e os Latossolos Vermelho-Amarelo Húmico e Vermelho-Amarelo, em dois valores de pH), visando recomendações seguras desse herbicida do ponto de vista técnico e ambiental. Para realização deste trabalho, utilizou-se a cromatografia líquida de alta eficiência. O tempo de equilíbrio da sorção do sulfentrazone foi de duas horas, e a cinética de sorção, caracterizada por duas fases distintas. O sulfentrazone foi pouco sorvido em todos os solos, mas a sorção foi maior em solos com teores de matéria orgânica, argila e pH corrigidos mais elevados. A dessorção desse herbicida foi baixa em todos os solos, porém menor no Cambissolo, com menor índice de histerese. Concluiu-se que a sorção do sulfentrazone é baixa em todos os solos avaliados, sendo maior naqueles que apresentam maior teor de matéria orgânica e argila e menor em solos arenosos. A dessorção do sulfentrazone é baixa e inversamente relacionada à histerese.

Palavras-chave: comportamento de herbicidas, bath equilibrium, isothermas de Freundlich.

ABSTRACT: Herbicides behavior in soil is influenced by interactions between its particles and soil colloids. Depending on the physical and chemical soil and herbicide characteristics these can be sorbed to colloids or available in the soil solution to be absorbed by plants, micro-organisms or be leached. Thus a agronomic herbicide effectiveness, as well as the potential of these compounds in the surface and groundwater contamination, depends on these interactions and climatic conditions. This study objective was to determine sulfentrazone sorption and desorption in different cultivated soils of Brazil (Entisol, Typic, Humic, and the Red-Yellow Oxisols Humic and red-yellow Oxisol, in two pH values) aiming recommendations secure this

herbicide technical and environmental point of view. To conduct this study we used the high performance liquid chromatography efficiency. Sulfentrazone sorption equilibrium time was about 2 hours and the sorption kinetics characterized by two distinct phases. Sulfentrazone was low sorption on all soils, however, was higher sorption to soil organic matter content, pH adjusted clay and higher. This herbicide desorption o was low in all soils, however, higher in cambissolo with lower hysteresis index. It was concluded that sulfentrazone sorption is low in all soils, and higher in soils with higher organic matter and clay and lowest in sandy soils. The sulfentrazone desorption is low and inversely related to hysteresis.

Keywords: herbicide behavior, bath equilibrium, Freundlich isotherms.

INTRODUÇÃO

Aproximadamente 50% de todos os pesticidas utilizados no mundo pertencem à classe dos herbicidas (ANVISA, 2010). Quando aplicados em pré ou pós-emergência das plantas daninhas, os herbicidas atingem direta ou indiretamente o solo, respectivamente. Quando utilizados sem o conhecimento de suas interações com o ambiente, eles podem causar danos às culturas subsequentes, à flora e à fauna do solo, além da contaminação de águas superficiais e subterrâneas (CELIS et al., 2005). Esses compostos podem desequilibrar os ecossistemas edáficos e aquáticos, além de exercer efeitos diretos e indiretos no crescimento e desenvolvimento das plantas cultivadas (DAS et al., 2003).

O sulfentrazone (N-[2,4-dichloro-5-[4-(difluoromethyl)-4,5-dihydro-3-methyl-5-oxo-1H-1,2,4-triazol-1-il] methanesulfonamide) é um herbicida registrado para o controle de plantas daninhas monocotiledôneas, dicotiledôneas e ciperáceas em culturas amplamente cultivadas no Brasil, como a soja, a cana-de-açúcar, o eucalipto e o cafeeiro (AGROFIT, 2014). Em conjunto, essas culturas ocupam área de aproximadamente 45,8 milhões de hectares (ABRAF, 2013; CONAB, 2014). Esse herbicida possui solubilidade de 780 mg L⁻¹ a pH 7,0, coeficiente de partição ($K_{ow_{pH7}}$) de 9,79, pressão de vapor de 1-10⁻⁹ mmHg (25 °C) e constante de dissociação (pKa) de 6,56. Segundo a US EPA (2014), o sulfentrazone pode apresentar alta persistência e mobilidade no solo e em sistemas aquáticos.

O comportamento dos herbicidas no solo baseia-se na interação desses compostos com os coloides do solo. A sorção de pesticidas no solo é expressa pelo coeficiente de

sorção, resultando na fração do herbicida ligada ao solo; juntamente com a dessorção, são tidos como os processos que potencialmente influenciam a lixiviação, a persistência e a atividade do composto no solo (YU et al., 2006). Esses processos podem levar à contaminação de águas subterrâneas por herbicidas, dependendo das interações de suas moléculas com as características físicas e químicas dos solos, além das condições climáticas (GARCÍA-JARAMILLO et al., 2014). Essas interações definem a sorção, dessorção, meia-vida das moléculas dos herbicidas e, conseqüentemente, a capacidade desses compostos de contaminarem o ambiente (GUO et al., 1993; KODEŠOVÁ et al., 2011; ČADKOVÁ et al., 2013).

Objetivou-se neste estudo determinar a sorção e a dessorção do herbicida sulfentrazone em diferentes solos cultivados do Brasil e identificar as principais características do solo que interferem nessas variáveis.

MATERIAL E MÉTODOS

Coletaram-se amostras dos solos Cambissolo húmico (CB), Argissolo Vermelho (PV), Neossolo Regolítico (RR) (Rio Grande do Sul –RS), Latossolo Vermelho-Amarelo húmico (LVAh) e Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) (Minas Gerais-MG), de 0 a 20 cm de profundidade. Metade dessas amostras dos Latossolos foi tratada com CaCO_3 e incubada por 30 dias, e a outra metade, mantida em condição natural. Após essa etapa, foram caracterizadas as propriedades químicas e físicas das amostras (Tabela 1).

Tabela 1 - Atributos físicos e químicos dos solos com e sem correção do pH

Solos	pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	t	V	M	MO
	H ₂ O	mg dm ⁻³		-----cmol _c dm ⁻³ -----					%		dag kg ⁻¹
Neossolo	5,1	9,1	115,0	3,30	0,70	0,70	8,09	4,99	35	14,0	5,10
Argissolo	5,2	1,5	27,0	1,2	0,6	2,1	6,77	3,96	22	53,0	2,1
Cambissolo	5,1	5,9	99,0	0,9	0,5	1,7	6,77	3,35	20	51,0	2,3
LVAh sc	4,8	2,0	46,0	0,6	0,7	1,4	10,73	2,81	12	50,0	4,3
LVAh cc	5,8	2,0	46,0	4,0	0,7	0,0	6,77	4,81	41	0,0	4,3
LVA sc	5,1	0,6	9,0	0,0	0,06	1,6	5,3	1,68	2,9	90,7	2,07
LVA cc	6,5	0,6	9,0	0,34	0,15	0,0	2,52	0,51	60	0,0	2,07
		Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Classe Textural					
		dag kg ⁻¹									
Neossolo		26	25	17	32	Franco Argilo-Arenoso					
Argissolo		12	30	20	38	Franco Argilo-Arenoso					
Cambissolo		31	31	12	26	Franco Argilo-Arenoso					
LVAh		23	13	5	59	Muito Argiloso					
LVA		11	10	17	62	Muito Argiloso					

pH em água; P - K - Extrator Mehlich 1; Ca - Mg - Al - Extrator: KCl - 1 mol/L; H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0; t - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; V - Saturação por Bases; m - Saturação por Alumínio; LVAh sc - Latossolo Vermelho-Amarelo húmico sem calagem; LVAh cc - Latossolo Vermelho-Amarelo húmico com calagem; LVA sc - Latossolo Vermelho-Amarelo sem calagem; LVA cc - Latossolo Vermelho-Amarelo com calagem.

O tempo de equilíbrio entre a solução do herbicida e o solo foi determinado, a fim de que a sorção se mantivesse constante. As análises de sorção e dessorção do sulfentrazone foram realizadas de acordo com as recomendações da OECD (2000). Nessa determinação utilizou-se uma solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ contendo 6 mg L⁻¹ de sulfentrazone, obtida a partir de uma solução-estoque de 1.000 mg L⁻¹ (grau de pureza de 92,01%). Adicionaram-se 10,0 mL dessa solução em tubos de polipropileno contendo 2,00 g de solo, agitando-os por diferentes tempos (0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 12; 16; 24; e 30 horas), na temperatura de 27 ± 2 °C. Após a agitação, as amostras foram centrifugadas a 2.260 g por sete minutos. Parte do sobrenadante foi filtrada em filtro Milipore com membrana PTFE de 0,45 µm, para posterior análise por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE). Considerou-se como tempo de equilíbrio o tempo de agitação a partir do qual a concentração da solução analisada permaneceu constante.

Para determinação da sorção do sulfentrazone, utilizaram-se soluções do herbicida nas concentrações de 1, 2, 3, 4, 5 e 6 mg L⁻¹ em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹. Adicionaram-se 10,0 mL dessas soluções em tubos de polipropileno contendo 2,00 g de solo, colocando-os sob agitação pelo tempo de equilíbrio determinado anteriormente. Após agitação, as amostras foram centrifugadas a 2.260 g, por sete minutos. O sobrenadante foi retirado e filtrado em filtro Milipore de 0,45 µm, para posterior análise cromatográfica.

A quantidade de herbicida sorvido ao solo (C_s), em mg kg⁻¹, foi calculada por diferença entre a quantidade de solução-padrão inicialmente adicionada ao solo (C_p), em mg L⁻¹, e a quantidade encontrada na solução de equilíbrio (C_e), em mg L⁻¹. De posse dos valores de C_e e de C_s, ajustou-se a equação de Freundlich (C_s = K_f C_e^{1/n}) para obtenção dos coeficientes de sorção, em que K_f e 1/n são constantes empíricas que representam a capacidade e intensidade de sorção, respectivamente.

Para determinação da dessorção, 2 mL da solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ sem herbicida foram adicionados aos tubos utilizados na sorção. Esses tubos foram submetidos à nova agitação pelo mesmo tempo e temperatura em que foram realizados os ensaios de sorção. Após agitação, as amostras foram centrifugadas a 2.260 g, por sete minutos. Do sobrenadante, 2 mL foram filtrados em filtro Milipore de 0,45 µm, para posterior análise cromatográfica.

A quantidade de herbicida dessorvido do solo (C_d), em mg kg⁻¹, foi calculada por diferença entre a quantidade antes sorvida ao solo, em mg kg⁻¹, e a quantidade que retornou para a solução de equilíbrio (C_e), em mg L⁻¹. De posse do novo C_s (quantidade antes sorvida menos a dessorvida) e de valores da nova solução de equilíbrio (C_e), ajustou-se a equação de Freundlich (C_s = K_f C_e^{1/n}) para obtenção dos coeficientes de dessorção. Calculou-se também o índice de histerese, dividindo-se os valores de 1/n da dessorção pelos da sorção.

A determinação quantitativa do sulfentrazone foi feita em sistema de cromatografia líquida de alta eficiência, modelo Shimadzu LC 20AT, munido de um detector de arranjos de diodos (Shimadzu SPD 20A), com coluna de aço inox (Shimadzu VP- ODS Shim-pack 250 mm x 4,6 mm d. i.). As condições cromatográficas para a análise foram: fase móvel composta por água acidificada com ácido fosfórico 0,1% e acetonitrila na proporção 50:50 (v/v); fluxo de 1,0 mL min⁻¹; volume de injeção de 20 µL; e comprimento de onda de 207 nm. O tempo de retenção do sulfentrazone nessas condições foi de aproximadamente 7,5 minutos. A quantificação foi realizada por meio da comparação das áreas obtidas nos cromatogramas para cada ensaio, pelo

método de calibração externa. A identificação foi feita pelo tempo de retenção, utilizando-se um padrão analítico do sulfentrazone.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tempo de equilíbrio da sorção do sulfentrazone foi de duas horas, e a cinética de sorção, caracterizada por duas fases distintas (Figura 1).

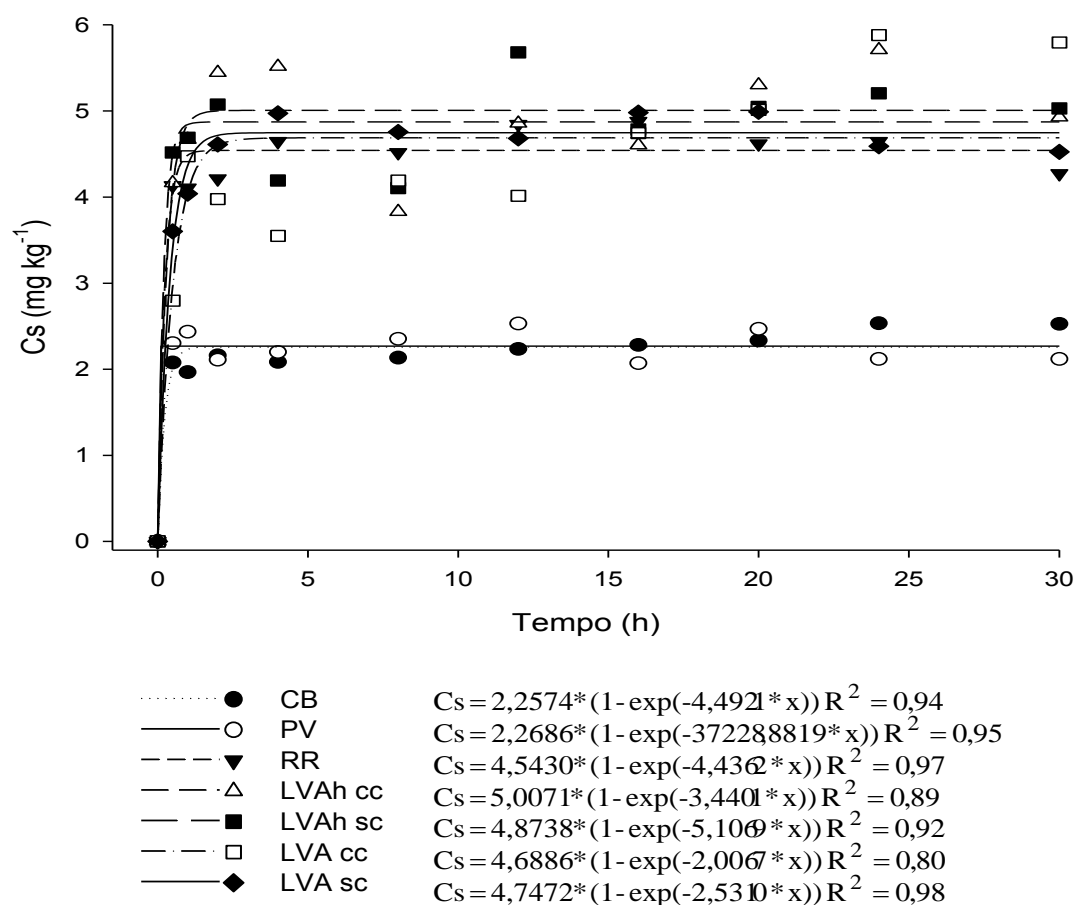


Figura 1 - Curvas de cinética de sorção para o sulfentrazone no Cambissolo húmico (CB), Argissolo Vermelho (PV), Neossolo Regolítico (RR), Latossolo Vermelho-Amarelo húmico (LVAh) com e sem calagem e Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) com e sem calagem, em função do tempo em horas.

O fato de a cinética de sorção do sulfentrazone caracterizar-se por duas fases é atribuído à adsorção rápida inicial, uma vez que grande número de sítios na superfície está disponível e os poros dos agregados do solo, vazios, o que facilita a difusão. Contudo, na segunda fase, a superfície interna dos poros ocupados e a difusão nos poros

reduzida tornam a sorção mais difícil e lenta (MIRZAEI et al., 2013). Essas duas fases são atribuídas ainda a processos de adsorção em diferentes superfícies: a primeira fase associada com a superfície externa, e a segunda, com camadas internas, que é menos energeticamente favorável (MARCO-BROWN et al., 2014). À medida que os sítios superficiais são saturados, a sua ocupação é mais dificultada, devido às forças de repulsão entre as moléculas do soluto na fase sólida e na solução (LIU et al., 2010; ROCHA et al., 2013).

O sulfentrazone foi pouco sorvido em todos os solos, porém observou-se maior sorção em solos argilosos, com maiores teores de matéria orgânica e pH corrigidos (Figura 2 e Tabela 2).

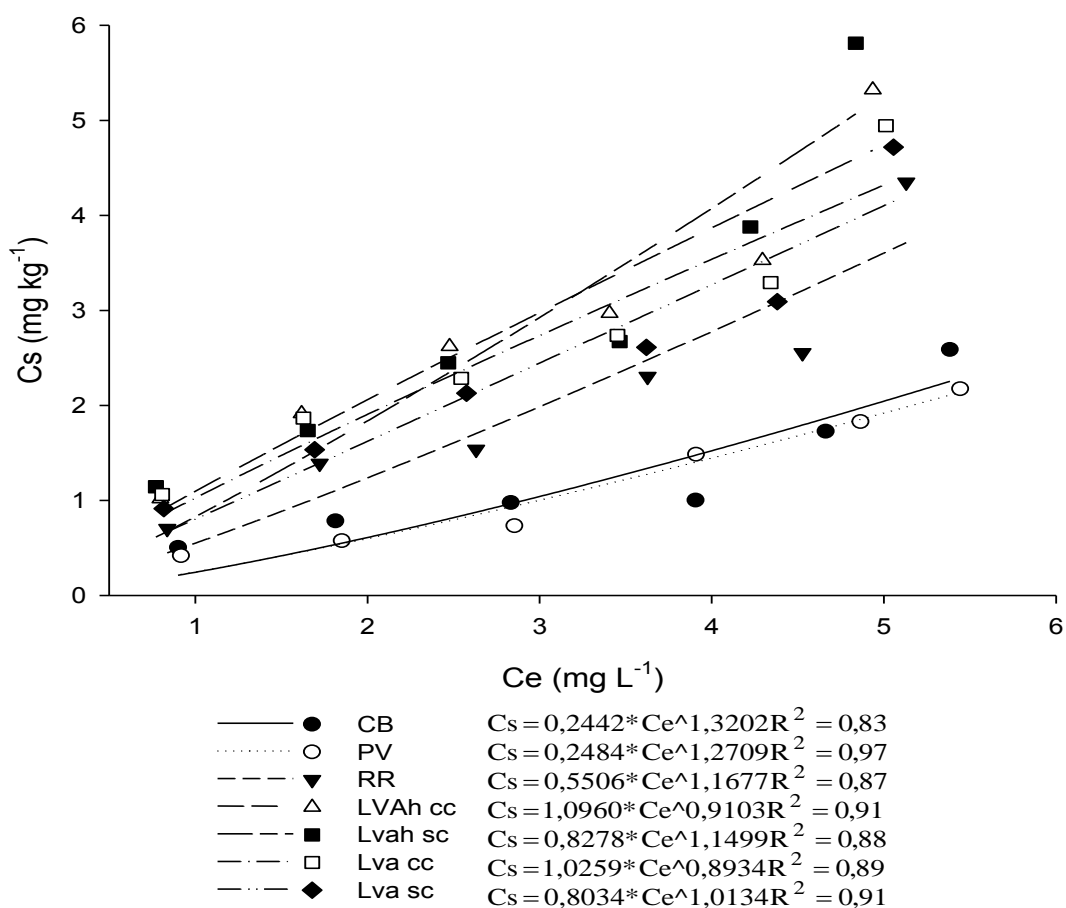


Figura 2 - Isotermas de sorção do sulfentrazone no Cambissolo húmico (CB), Argissolo Vermelho (PV), Neossolo Regolítico (RR), Latossolo Vermelho-Amarelo húmico (LVAh) com e sem calagem e Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) com e sem calagem.

Tabela 2 - Estimativas dos coeficientes de sorção (Kf, 1/n e Koc) das isotermas de sorção do sulfentrazone e índice de histerese (H) em diferentes solos

Coeficientes	Solos						
	CB	PV	RR	LVAh cc	LVAh sc	LVA cc	LVA sc
Kf	0,2442	0,2484	0,5506	1,0960	0,8278	1,0259	0,8034
1/n	1,3202	1,2709	1,1677	0,9103	1,1499	0,8934	1,0134
Koc	8,2358	20,3451	41,1753	43,8400	33,1120	85,2438	66,7559
H	0,5158	1,2943	1,0379	1,1998	1,1352	1,1676	1,3169

Cambissolo húmico (CB), Argissolo Vermelho (PV), Neossolo Regolítico (RR), Latossolo Vermelho-Amarelo húmico (LVAh) com e sem calagem e Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) com e sem calagem.

O fato de o sulfentrazone ser pouco sorvido no Cambissolo e Neossolo pode ser devido aos baixos teores de argila desses solos (FIRMINO et al., 2008). No caso dos Latossolos e Argissolos, isso se deve a uma provável obstrução das argilas disponíveis por uma quantidade elevada de compostos amorfos de agrupamentos de Fe, que dão suporte para os minerais oxídicos, como a hematita. Estes podem agregar-se aos sítios de ligações das argilas, reduzindo a CTC efetiva dos solos (STIPIČEVIĆ et al., 2014), bem como a porosidade e a superfície específica desses adsorventes (PAUL et al., 2010). Outro fator também relacionado à baixa sorção do sulfentrazone é o baixo teor de matéria orgânica no Argissolo, Cambissolo e Latossolo Vermelho-Amarelo (LI et al., 2003).

A maior sorção do sulfentrazone em solos com maiores teores de argila e matéria orgânica pode ser explicada pela maior superfície específica e pelos sítios de adsorção disponíveis nesses solos (KEARNS et al., 2014). De modo geral, a maior interação do herbicida pelos coloides do solo ocorre por meio das interações de superfície, como ligações de hidrogênio e interações de Van der Waals (CLAUSEN et al., 2001; KOVAIOS et al., 2006; VIVIAN et al., 2007), ligando-se a grupos hidroxílicos e carboxílicos (LIAO et al., 2014). No entanto, além do teor de argila e matéria orgânica, o herbicida pode sorver mais, dependendo do estado de decomposição da matéria orgânica do solo (LI et al., 2003; SI et al., 2006; GARCÍA-JARAMILLO et al., 2014). Isso foi comprovado pela redução da mobilidade de alguns herbicidas após a adição de matéria orgânica ao solo (MARTIN et al., 2012; FENOLL et al., 2014). Para herbicidas como o 2,4-D, também de caráter ácido, as interações hidrofóbicas com a matéria orgânica são mais importantes em solos com maior pH (MULLER et al., 2014); mesmo em solos com baixo teor de matéria orgânica, superfícies minerais hidrofóbicas tornam-

se importantes e podem contribuir significativamente na retenção de compostos hidrofóbicos (STIPIČEVIĆ et al., 2014).

A maior sorção do sulfentrazone no LVAh e LVA com maiores pHs pode ser explicada pela presença de algumas argilas que, devido à existência de grupos aluminol, silanol e anéis de siloxano, são dependentes de pH. Com o seu aumento, aumenta-se também a capacidade de troca catiônica (CTC) (SPADOTTO et al., 2003; KOSKINEN et al., 2006; STIPIČEVIĆ et al., 2014). Em baixos valores de pH, as hidroxilas de condensação formam cargas positivas devido à protonação (HU; LIU, 2003), ocorrendo a repulsão entre as cargas do solo e o herbicida, o que resulta na redução da sorção do sulfentrazone (FREITAS et al., 2014). Por outro lado, Ohmes e Mueller (2007) relatam que a sorção do sulfentrazone foi menor em solos com valores de pH maiores que o pKa do herbicida, em relação a solos com pH menor. Geralmente, herbicidas ácidos fracos são mais sorvidos nos solos com menores pHs, dependendo da fração de moléculas neutras e aniônicas, as quais estão em função do pH e do pKa. Quando o pH do solo for menor que o pKa, o herbicida estará proporcionalmente na forma neutra, e as hidroxilas nas superfícies de óxidos e complexos da matéria orgânica estarão carregadas positivamente em pHs abaixo do ponto de carga zero, proporcionando assim sítios de ligação para o herbicida (MULLER et al., 2014).

A dessorção do sulfentrazone foi baixa em todos os solos, porém menor no Cambissolo, com menor índice de histerese (Figura 3 e Tabela 2).

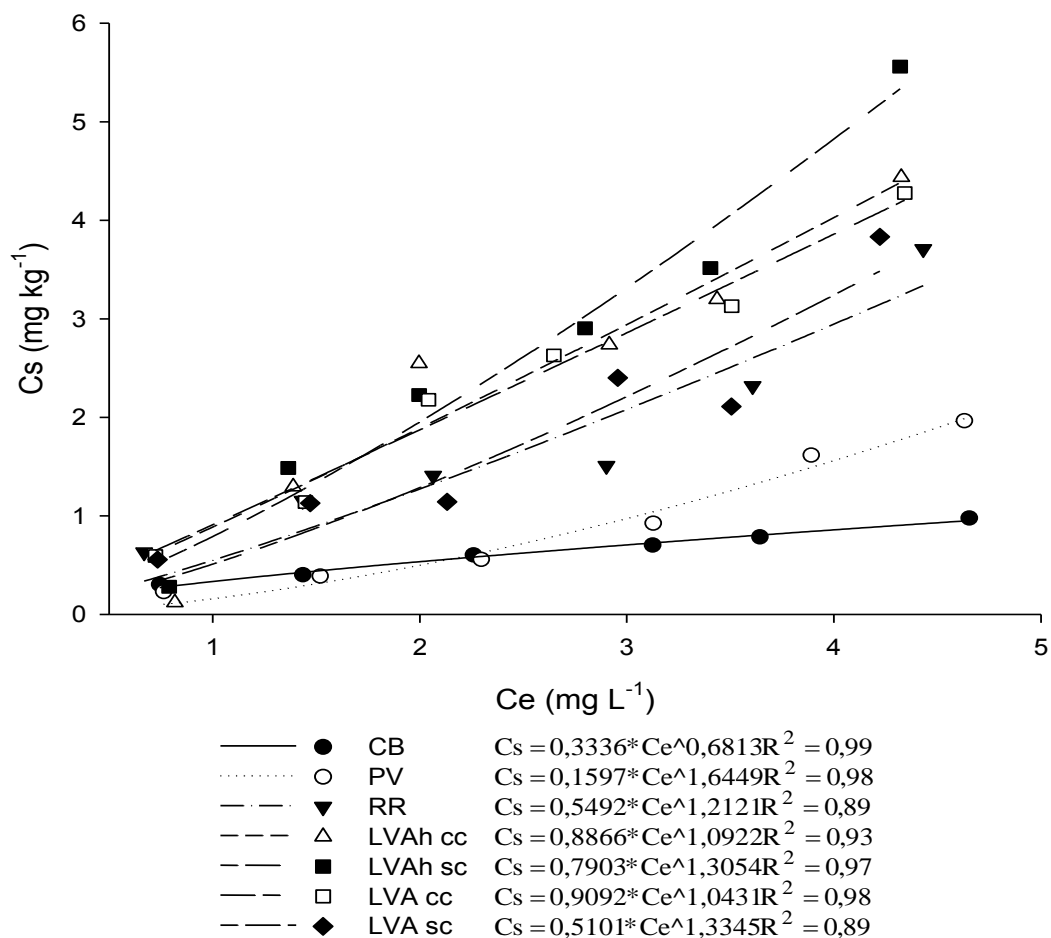


Figura 3 - Isothermas de dessorção do sulfentrazone no Cambissolo húmico (CB), Argissolo Vermelho (PV), Neossolo Regolítico (RR), Latossolo Vermelho-Amarelo húmico (LVAh) com e sem calagem e Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) com e sem calagem.

A baixa dessorção do sulfentrazone pode estar ligada à pequena porção do composto adsorvido e fortemente ligada aos coloides do solo (STIPIČEVIĆ et al., 2014). A baixa dessorção também pode ser uma consequência de um alto gradiente de concentração durante o processo de sorção, permitindo que as moléculas sorvidas penetrem profundamente nos poros dos complexos organominerais, podendo tornar lenta a dessorção (CHEFETZ et al., 2004).

A menor dessorção do sulfentrazone no Cambissolo e o menor índice de histerese devem-se aos tipos de argila desse solo. Para o atrazine, solos com argilas oxidicas como nos Latossolos tem menor capacidade de sorver esse herbicida comparado a solos com argilas como a montmorilonita e altos teores de matéria orgânica (PRADO et al., 2014). E uma baixa histerese significa maior dificuldade do herbicida previamente

sorvido ser dessorvido (KOSKINEN et al., 2006), devido às interações entre as superfícies das partículas do solo e o herbicida (KOSKINEN et al., 2006).

Tendo em vista o exposto, conclui-se que o tempo de equilíbrio da sorção do sulfentrazone foi de duas horas. A sorção do sulfentrazone foi maior em solos com maiores teores de matéria orgânica e argila e menor em solos arenosos, mas, de modo geral, baixa em todos os solos. A dessorção do sulfentrazone foi baixa e inversamente relacionada à histerese.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG e ao CNPq, pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012**. ABRAF. – Brasília, 2013.

AGROFIT – **Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários**. 2014. Disponível em: http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acessado em: 26 de outubro de 2014.

ANVISA – Agencia Nacional de Vigilância Sanitária. **Monitoramento do Mercado de Agrotóxicos: Observatório da Indústria de Agrotóxicos**. 2010, 98p

ČADKOVÁ, E. et al. Tebuconazole sorption in contrasting soil types. **Soil and Sediment Contamination: an International Journal**, v.22, p.404–414, 2013.

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, p. 287-297, 2005.

CHEFETZ, B. et al. Sorption–desorption behavior of triazine and phenylurea herbicides in Kishon river sediments. **Water Research**, v.38, p.4383-4394, 2004.

CLAUSEN, L. et al. Adsorption of pesticides onto quartz, calcite, kaolinite, and α -alumina. **Journal of Environmental Quality**, v.30, p.846–857, 2001.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. 2014. **Levantamento da Safra de Grãos, Café, Cana-de-Açúcar e Laranja (Área Plantada, Produtividade e Produção)**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&>> Acessado em: 7 de outubro-2014.

DAS, A.C. et al. Effect of the herbicides oxadiazon and oxyfluorfen on phosphates solubilizing microorganisms and their persistence in rice fields. **Chemosphere**, v.53, p.217–221, 2003.

FENOLL, J. et al. Minimization of methabenzthiazuron residues in leaching water using amended soils and photocatalytic treatment with TiO₂ and ZnO. **Journal of Environmental Sciences**, v.26, p.757–764, 2014.

FIRMINO, L.E. et al. Sorção do imazapyr em solos com diferentes texturas. **Planta daninha**, v.26, p.395-402, 2008.

FREITAS, M.A.M. et al. Sorção do sulfentrazone em diferentes tipos de solo determinada por bioensaios. **Planta Daninha**, v.32, p.385-392, 2014.

GARCÍA-JARAMILLO, M. et al. Effect of soil organic amendments on the behavior of bentazone and tricyclazole. **Science of the Total Environment**, v.467, p.906–913, 2014.

GUO, L. et al. Sorption and movement of alachlor in soil modified by carbon-rich wastes. **Journal of Environmental Quality**, v.22, p.186–194, 1993.

HU, Y.; LIU, X. Chemical composition and surface property of kaolins. **Minerals Engineering**, v.16, p.1279-1284, 2003.

KEARNS, J.P. et al. 2,4-D adsorption to biochars: Effect of preparation conditions on equilibrium adsorption capacity and comparison with commercial activated carbon literature data. **Water Research**, v.62, p.20-28, 2014.

KODESOVÁ, R. et al. Pesticide adsorption in relation to soil properties and soil type distribution in regional scale. **Journal of Hazardous Materials**, v.186, p.540–550, 2011.

KOSKINEN, W.C. et al. Sorption–desorption of flucarbazone and propoxycarbazono and their benzenesulfonamide and triazolinone metabolites in two soils. **Pest Management Science**, v.62, p.598–602, 2006.

- KOVAIOS, I.D. et al. Adsorption of atrazine on soils: model study. **Journal of Colloid And Interface Science**, v.299, p.88–94, 2006.
- LI, H. et al. Sorption and desorption of pesticides by clay minerals and humic acid-clay complexes. **Soil Science Society of America Journal**, v.67, p.122–131, 2003.
- LIAO, R. et al. Quantitative fractal evaluation of herbicide effects on the water-absorbing capacity of superabsorbent polymers. **Journal of nanomaterials**, v.14, p.10-19, 2014.
- LIU, Y.H. et al. Adsorption and desorption behavior of herbicide diuron on various Chinese cultivated soils. **Journal of Hazardous Materials**, v.178, p.462-468, 2010.
- MARCO-BROWN, J.L. et al. Adsorption of picloram herbicide on montmorillonite: Kinetic and equilibrium studies. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v.449, p.121–128, 2014.
- MARTIN, S.M. et al. Marked changes in herbicide sorption–desorption upon ageing of biochars in soil. **Journal of agricultural and food chemistry**, v.231, p.70–78, 2012.
- MIRZAEI, A. et al. Kinetic and equilibrium modeling of single and binary adsorption of methyl tert-butyl ether (MTBE) and tert-butyl alcohol (TBA) onto nano-perfluorooctyl alumina. **Chemical Engineering Journal**, v.231, p.550–560, 2013.
- MULLER, K. et al. A new method to quantify how water repellency compromises soils' filtering function. **European Journal of Soil Science**, v.65, p.348–359, 2014.
- OECD – Organization for Economic Co-operation and Development. **Guidelines for testing of chemicals: adsorption-desorption using a batch equilibrium method**. Paris-France, 2000. 106, 44p.
- OHMES, G.A.; MUELLER, T. C. Sulfentrazone adsorption and mobility in surface soil of the southern United States. **Weed Technology**, v.21, p.796-800, 2007.
- PAUL, B. et al. Adsorption of the herbicide simazine on moderately acid-activated beidellite. **Applied Clay Science**, v.49, p.80–83, 2010.
- PRADO, B. et al. Transport, sorption and degradation of atrazine in two clay soils from Mexico: Andosol and Vertisol. **Geoderma**, v.232–234, p.628–639, 2014.

ROCHA, P.R.R. et al. Sorção e dessorção do diuron em quatro latossolos brasileiros. **Planta Daninha**, v.31, p.231-238, 2013.

RODRIGUES, B.N.; ALMEIDA, F.S. **Guia de herbicidas**. 6. ed. Londrina: Edição dos Autores, 2011. 697p

SI, Y. et al. Influence of organic amendment on the adsorption and leaching of ethametsulfuron-methyl in acidic soils in China. **Geoderma**, v.130, p.66–76, 2006.

SPADOTTO, C.A.; HORNSBY, A. G. Soil sorption of acidic pesticides: modeling pH effects. **Journal of Environmental Quality**, v.32, p.949–956, 2003.

STIPIČEVIĆ, S. et al. Ability of natural, acid-activated, and surfactant-modified Terra Rossa soils to sorb triazine herbicides and their degradation products. **Applied Clay Science**, v.89, p.56–62, 2014.

TOMLIN, C. D. S. **The pesticide manual: A world compendium**. 15th. ed. Croydon: British Crop Protection Council, 2011. 1457p.

US EPA – **United States, Environmental Protection Agency. 2014. Pesticide Fact Sheet: Sulfentrazone.** Disponível em: http://www.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/registration/fs_PC-129081_27-Feb-97.pdf Acessado em 21 de outubro, 2014.

VIVIAN, R. et al. Persistência e lixiviação de ametryn e trifloxysulfuron-sodium em solo cultivado com cana-de-açúcar. **Planta daninha**, v.25, p.111-124, 2007.

WEBER, J.B. et al. Calculating pesticide sorption coefficients (Kd) using selected soil properties. **Chemosphere**, v.55, p.157-166, 2004.

YU, Y.L. et al. An exploration of the relationship between adsorption and bioavailability of pesticides in soil to earthworm. **Environmental Pollution**, v.141, p.428–433, 2006.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fitorremediação é uma opção de baixo custo e eficiente no tratamento de solos contaminados com herbicidas de longo período residual. Para o sucesso dessa técnica, além do uso de plantas associadas à sua microbiota, existem outros fatores importantes relacionados ao solo, como matéria orgânica, umidade e pH.

Neste trabalho, objetivou-se avaliar a remediação do sulfentrazone em um Argissolo Vermelho-Amarelo e sua sorção e dessorção em diferentes tipos de solo. Para os estudos da remediação, inicialmente foi avaliada a biomassa e a atividade microbiana do solo em área tratada ou não com o sulfentrazone e cultivada ou não com *C. ensiformis*. Numa segunda etapa, em condições de campo, foi avaliada a eficiência de *C. ensiformis* em remediar o solo contaminado com o sulfentrazone; para isso, foi utilizado o sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor*) como bioindicador. Neste experimento, os tratamentos foram arranjos em esquema fatorial 2x3 - solo tratado ou não com o sulfentrazone associado a três manejos de *C. ensiformis*. Os manejos consistiram na ausência de cultivo, cultivo e incorporação ao solo de *C. ensiformis* por ocasião de seu florescimento e cultivo, com retirada da parte aérea das plantas dessa espécie das parcelas experimentais após a roçada. Os estudos de sorção e dessorção do sulfentrazone foram realizados utilizando cromatografia líquida de alta eficiência em amostras de cinco solos (Neossolo Regolítico, Argissolo Vermelho, Cambissolo Húmico, Latossolo Vermelho-Amarelo Húmico e Latossolo Vermelho-Amarelo, em dois valores de pH).

Concluiu-se que:

- O cultivo de *C. ensiformis* em áreas contaminadas com sulfentrazone pode reduzir o efeito prejudicial desse herbicida na atividade da microbiota do solo.
- *C. ensiformis* é capaz de remediar áreas contaminadas com sulfentrazone, independentemente da retirada ou não da parte aérea das plantas das áreas contaminadas.

O sulfentrazone foi pouco sorvido em todos os solos, mas a sorção foi maior naqueles com teores de matéria orgânica e argila e pHs mais elevados. A dessorção do sulfentrazone foi baixa em todos os solos, porém menor no Cambissolo, o qual apresentou menor índice de histerese.