

**INTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS
CAMPUS SÃO JOÃO EVANGELISTA
LEANDRO GONÇALVES MOREIRA**

**FITORREMEDIÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM SULFENTRAZONE
UTILIZANDO EM COMUNIDADE *Mucuna aterrima*, *Crotalaria juncea* E *Dolichos
lablab***

**SÃO JOÃO EVANGELISTA
2018**

LEANDRO GONÇALVES MOREIRA

**FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM SULFENTRAZONE
UTILIZANDO EM COMUNIDADE *Mucuna aterrima*, *Crotalaria juncea* E *Dolichos
lablab***

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Instituto Federal de Minas
Gerais – Campus São João Evangelista
como exigência parcial para obtenção do
título de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Me Alisson José Eufrásio de
Carvalho

SÃO JOÃO EVANGELISTA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

M835f Moreira, Leandro Gonçalves.
2017

Fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone utilizando em comunidade Mucuna aterrima, Crotalaria juncea e Dolichos lablab. / Leandro Gonçalves Moreira. – 2018.

33f.; il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista, 2018.

Orientadora: M. Alisson José Eufrásio de Carvalho.

1. Adubos verdes. 2. Sorghum bicolor. 3. Fitotoxicidade. I. Moreira, Leandro Gonçalves. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista. III. Título.

CDD 631.8

Elaborada pela Biblioteca Professor Pedro Valério

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais
Campus São João Evangelista

Bibliotecária Responsável: Rejane Valéria Santos – CRB-6/2907

LEANDRO GONÇALVES MOREIRA

**FITORREMEDIÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM SULFENTRAZONE
UTILIZANDO EM COMUNIDADE *Mucuna aterrima, Crotalaria juncea E Dolichos
lablab***

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Instituto Federal de Minas
Gerais – Campus São João Evangelista
como exigência parcial para obtenção do
título de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Me Alisson José Eufrásio de
Carvalho

BANCA EXAMINADORA

Orientador Prof. Me Alisson José Eufrásio de Carvalho
Instituto Federal de Minas Gerais – Campus São João Evangelista

Doutoranda Patrícia Lage
Instituto Federal de Minas Gerais – Campus São João Evangelista

Me Ari Medeiros Braga Neto
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Primeiramente a Deus, pois sem ele nada conseguiria. Às minhas mães Maria Salomé e Maria das Dores e aos meus irmãos Alysson e Almir por terem sido alicerces para essa minha conquista. E também às minhas irmãs Geralda, Berenice, Rosane e sobrinha Elisângela pelas ajudas e incentivos. Enfim, a todos que de uma forma ou outra contribuíram para essa vitória.

Dedico.

Agradecimentos

Agradeço a DEUS por mais essa conquista em minha vida, pois sem ele não seria possível chegar a lugar algum, ele sempre será a luz que me guiará a meus sonhos e objetivos.

À minha mãe, Maria Salomé. Obrigado pelas orações e ajudas constantes e principalmente pelo seu amor, pois nunca mediu esforços para me empurrar rumo a vitória.

À minha mãe, Maria das Dores. Obrigado pelas orações e incentivos, fatores fundamentais para impulsionar para a conquista.

Aos meus irmãos, Alysson e Almir. Obrigado por contribuírem grandemente para minha formação, vocês foram parte da base para essa minha construção.

Às minhas irmãs Geralda, Berenice e Rosane e sobrinha Elisângela. Obrigado pelas ajudas e palavras que estimulam a seguir em frente.

À minha cunhada Marília e minha namorada Tamires. Obrigado pelas palavras valiosas de incentivo.

Ao meu orientador, professor Me. Alisson José Eufrásio de Carvalho. Obrigado pelos grandes ensinamentos transmitidos, pelo incentivo e sua amizade.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais campus São João Evangelista, pela oportunidade de realização desta graduação.

Enfim, a todos que contribuíram de uma forma ou outra para mim chegar ao sucesso dessa vitória!

RESUMO

Dentre as novas tecnologias, a fitorremediação é opção para a descontaminação de áreas que receberam intensas aplicações de herbicidas. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a tolerância de uma comunidade de adubos verdes ao herbicida sulfentrazone e a capacidade dessa comunidade em diminuir o efeito fitotóxico do herbicida no bioindicador *Sorghum bicolor*. Foram avaliadas, em casa de vegetação, quatro doses do herbicida sulfentrazone (0; 1,0; 2,0 e 4,0 l.ha⁻¹) em pré-emergência dos adubos verdes *Mucuna aterrima*, *Crotalaria juncea* e *Dolichos lablab*. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 4 x 3, sendo quatro doses de herbicidas e três comunidades de plantas, com cinco repetições. A fitotoxicidade do herbicida nas plantas fitorremediadoras foi avaliada aos 15, 30 e 45 dias após a semeadura (DAS). Aos 60 DAS também foi avaliada a massa de matéria fresca e seca da parte aérea das espécies vegetais (MFPA e MSPA). Foi avaliado o Índice de Velocidade de Germinação (IVG) das espécies sensíveis com os dados referentes ao número de plântulas germinadas até os 20 DAS. Os resultados evidenciaram que a *Crotalaria juncea* foi a espécie mais tolerante ao solo contaminado por sulfentrazone, com possível efeito fitorremediador. A comunidade de adubos verdes e a comunidade de plantas nativas proporcionaram melhores condições para o cultivo de sorgo cultivado em sucessão em solo contaminado por sulfentrazone.

Palavras-chave: Adubos verdes, *Sorghum bicolor*, Fitotoxicidade.

ABSTRACT

Among the new technologies, phytoremediation is an option for the decontamination of areas that received intense applications of herbicides. This work was developed with the objective of evaluating the tolerance of a community of green manures to the herbicide sulfentrazone and the ability of this community to reduce the phytotoxic effect of the herbicide in the bioindicator *Sorghum bicolor*. Four doses of the herbicide sulfentrazone (0, 1.0, 2.0 and 4.0 l.ha⁻¹) were evaluated in the greenhouse of the green manures *Mucuna aterrima*, *Crotalaria juncea* and *Dolichos lablab*. The treatments were arranged in a 4 x 3 factorial scheme, four herbicide doses and three plant communities, with five replications. Herbicide phytotoxicity in phytoremediation plants was evaluated at 15, 30 and 45 days after sowing (DAS). At 60 DAS was also evaluated the mass of fresh and dry matter of the aerial part of the plant species (MFPA and MSPA). The Germination Speed Index (IVG) of the sensitive species was evaluated with the data referring to the number of seedlings germinated up to 20 DAS. The results showed that *Crotalaria juncea* was the most soil tolerant species contaminated by sulfentrazone, with possible phytoremediation effect. The green manure community and the native plant community provided better conditions for the cultivation of sorghum grown in succession on soil contaminated with sulfentrazone.

Key words: Green fertilizers, *Sorghum bicolor*, Phytotoxicity.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da camada arável (0 - 20cm) do solo utilizado no experimento.	18
Tabela 2 - Avaliação de fitotoxicidade de acordo com a escala de Alam (1974).	19
Tabela 3 - Resumo da análise de variância do índice de toxicidade avaliado nas espécies fitorremediadoras cultivado em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.	21
Tabela 4 - Toxicidade das plantas fitorremediadoras cultivado em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.	21
Tabela 5 - Toxicidade das plantas fitorremediadoras cultivado em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.	22
Tabela 6 - Toxicidade das plantas fitorremediadoras cultivado em solo tratado com o herbicida sulfentrazone aos 15, 30 e 45 dias após aplicação do herbicida.	22
Tabela 7 - Resumo da análise de variância da altura avaliada das fitorremediadoras cultivado em solos contaminados por sulfentrazone.	23
Tabela 8 - Altura das plantas fitorremediadoras cultivado em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.	24
Tabela 9 - Resumo da análise de variância do diâmetro avaliada das fitorremediadoras cultivado em solos contaminados por sulfentrazone.	24
Tabela 10 - Diâmetro das plantas fitorremediadoras cultivado em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.	25
Tabela 11 - Resumo da análise de variância com os dados dos atributos avaliados das espécies fitorremediadoras sulfentrazone.	25
Tabela 12 - Acúmulo de massa fresca da parte aérea de fitorremediadoras cultivada em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.	26
Tabela 13 - Acúmulo de massa seca da parte aérea de fitorremediadoras cultivada em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.	26
Tabela 14 - Resumo da análise de variância do índice de velocidade de germinação avaliado na cultura do sorgo cultivado em sucessão a espécies fitorremediadoras.	27
Tabela 15 - Índice de velocidade de germinação do sorgo cultivado em sucessão a diferentes comunidades de plantas.	27

Tabela 16 - Resumo da análise de variância com os dados dos atributos avaliados na cultura do sorgo cultivado em sucessão a espécies fitorremediadoras.....	28
Tabela 17 - Acúmulo de massa fresca da parte aérea do sorgo cultivada em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.....	28
Tabela 18 - Acúmulo de massa seca da parte aérea do sorgo cultivada em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.....	29

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 SULFENTRAZONE	11
2.2 FITORREMEDIÇÃO.....	12
2.3 FITORREMEDIADORAS.....	15
2.3.1 <i>Mucuna aterrima</i>	15
2.3.2 <i>Crotalaria juncea</i>	16
2.3.3 <i>Dolichos lablab</i>	16
2.4 <i>Sorghum bicolor</i>	17
3 METODOLOGIA	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1 ÍNDICE DE FITOTOXICIDADE AVALIADO PARA AS FITORREMEDIADORAS .	21
4.2 ALTURA DAS FITORREMEDIADORAS	23
4.3 DIÂMETRO DE CAULE DAS PLANTAS DE FITORREMEDIADORAS	24
4.4 MASSA FRESCA E SECA DA PARTE AÉREA DAS LEGUMINOSAS.....	25
4.5 ÍNDICE DE VELOCIDADE DE GERMINAÇÃO DO SORGO (IVG).....	26
5 CONCLUSÃO	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1 INTRODUÇÃO

Os herbicidas são amplamente utilizados no ramo da atividade agrícola e consistem em uma importante tecnologia para alcançar altas produções em áreas extensas (PIRES, 2003). Porém, o emprego de moléculas com longo período residual pode deixar o solo impróprio para cultivo de espécies de interesse agrícola (PROCÓPIO, 2004).

A presença de resíduos de herbicidas no solo causa grande impacto ambiental que pode ser responsável por perdas econômicas, quando afeta culturas sensíveis, além da redução na biodiversidade (REIS et al., 2008; ROBINSON, 2008). Uma característica comum aos herbicidas utilizados na agricultura é o seu destino final, sejam estes aplicados em pré ou pós-emergência, geralmente em algum momento entrarão em contato com o solo, conseqüentemente, a sua dinâmica no solo dependerá dos processos físico-químicos no sistema solo que ocorrem constantemente (MANCUSO, NEGRISOLI, PERIM, 2011; OLIVEIRA e BRIGHENTI, 2011).

O sulfentrazone está dentre os herbicidas que apresentam elevada persistência no solo, e, portanto, elevado potencial de contaminação ambiental (RODRIGUES E ALMEIDA, 2011). O herbicida sulfentrazone - N-[2,4-dicloro5[4-(difluorometil)-4,5-di-hidro-3 metil-5-oxo-1 H-1,2,4-triazol-1-il] metanosulfonamida - é registrado no Brasil para o controle de plantas daninhas em pré-emergência nas culturas de cana-de-açúcar, soja, citros, café, eucalipto e em áreas não agrícolas (RODRIGUES & ALMEIDA, 2005). Por apresentar longa persistência no solo, este herbicida pode inviabilizar o cultivo de plantas sensíveis por um longo período após a sua aplicação, dependendo da dose de aplicação e das condições edafoclimáticas (VIVIAN et al., 2006).

O efeito residual prolongado do sulfentrazone no solo pode acarretar danos às culturas sucessoras suscetíveis, como milho, aveia-preta e sorgo (PEREIRA et al., 2000). Além disso, pode também provocar intoxicação no milho em sucessão à soja (ARTUZI & CONTIERO, 2006) e em milho, aveia e trigo; contudo, não prejudicou o desenvolvimento das culturas de girassol e feijão (BLANCO; VELINI, 2005).

Estudos realizados por Vivian e Main, (2006), constataram que a persistência do resíduo do sulfentrazone em argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar foi de 640 e 197 respectivamente, dias após a aplicação em 2003 e 2004, indicando grande risco de intoxicação das culturas em sucessão à cana-de-açúcar. Foram avaliadas reduções superiores a 30% na produção de algodão (MAIN et al., 2004).

Uma das alternativas para descontaminação do solo por esse herbicida é por meio da técnica da fitorremediação. Para viabilizar esse processo a primeira etapa deve se proceder com a identificação das plantas tolerantes a esse produto, que apresenta como mecanismo de ação a inibição da rota metabólica de síntese da enzima protoporfirinogênio oxidase (PROTOX), atuando indiretamente na síntese de clorofila em plantas sensíveis (SILVA et al., 2007).

A fitorremediação envolve a utilização de plantas, a microbiota e amenizantes (corretivos, fertilizantes, matéria orgânica, entre outros). As práticas agronômicas aplicadas em conjunto, os contaminantes são removidos, imobilizados ou tornam-se inofensivos ao meio ambiente (ACCIOLY & SIQUEIRA, 2000; SCRAMIN et al., 2001).

A fitorremediação é utilizada baseando-se na seletividade, natural ou desenvolvida, que algumas espécies apresentam a determinados tipos de compostos ou mecanismos de ação. Esse fato ocorre em alguns tipos de espécies agrícolas e plantas daninhas, que são tolerantes a certos tipos de herbicidas. A seletividade deve-se ao fato de que os compostos orgânicos podem ser translocados para outros tecidos da planta e subsequentemente volatilizados; podendo sofrer parcial ou completa degradação ou ser transformados em compostos menos tóxicos, especialmente menos fitotóxicos, combinados e/ou ligados a tecidos das plantas (compartimentalização) (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000; SCRAMIN et al., 2001).

A fitorremediação tem se mostrado uma técnica que gera resultados satisfatórios para descontaminação de solos por vários herbicidas, como tebuthiuron (PIRES et al., 2005a), trifloxysulfuron-sodium (SANTOS et al., 2007) e picloram (CARMO et al., 2008). Para estudos de fitorremediação de herbicidas nos solos, pesquisadores têm aplicado como metodologia, o bioensaio, devido a sua precisão satisfatória e o baixo custo de implantação. A técnica utiliza plantas dotadas de elevada sensibilidade à substância tóxica avaliada, essas plantas por sua vez atuam como bioindicadoras da presença de resíduos dessas substâncias no solo, que podem ser evidenciadas quando provocam alterações de características agronômicas da bioindicadora (MELO et al., 2010).

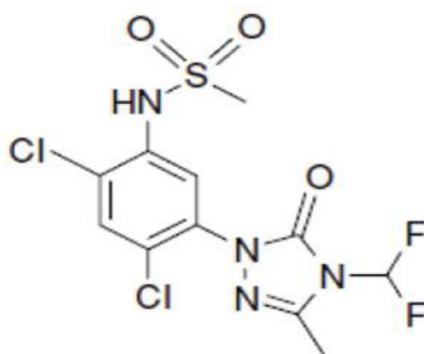
O objetivo deste trabalho foi avaliar uma comunidade de adubos verdes composta por três tipos de plantas: *Mucuna aterrima*, *Crotalaria juncea* e *Dolichos lablab*, em fitorremediar o solo contaminado com o herbicida sulfentrazone, usando como bioindicadora a cultura do sorgo (*Sorghum bicolor*).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SULFENTRAZONE

O herbicida sulfentrazone - N-[2,4-dicloro5[4-(difluorometil)-4,5-di-hidro-3 metil-5-oxo-1 H-1,2,4-triazol-1-il] metanosulfonamida – é registrado no Brasil para o controle de plantas daninhas em pré-emergência nas culturas de cana-de-açúcar, soja, citros, café, eucalipto e em áreas não agrícolas. Existe algumas características peculiares que diferencia o sulfentrazone dos outros produtos usados para realizar o controle de plantas daninhas, como exemplos elevados índices de seletividade, um amplo espectro de ação e grande eficiência em seu uso, possuindo um longo período de meia vida no solo, característica essa que permite a realização de poucas aplicação do herbicida para controle das plantas invasores indesejadas, levando o produtor a ter um custo reduzido no controle químico (MADALÃO et al., 2015).

Figura 1: Fórmula estrutural da molécula de sulfentrazone.



Fonte: CHEN (2003).

Ao inibir a enzima PROTOX, localizada nos cloroplastos, o sulfentrazone reduz a síntese de clorofilas, uma vez que essa enzima é a precursora das reações que transformam protoporfirinogênio IX em protoporfirina IX, e estes compostos são responsáveis pela formação das clorofilas. Com isso, ocorre o acúmulo de protoporfirinogênio IX e saída deste para o citoplasma, onde é oxidado formando a protoporfirina IX (SILVA, 2007), esta que por sua vez interage com oxigênio e luz, formando oxigênio “singlet”, uma espécie reativa de oxigênio (ROS), que desencadeia processos oxidativos como a peroxidação de lipídios das membranas (TRIPATHY et al., 2007).

Carretero, (2008) em estudo, constatou que o sulfentrazone causa redução da fotossíntese devido a menor síntese de clorofilas, que são proteínas que apresentam função

vital, capturando a energia luminosa, que será convertida em poder redutor para o processo de fixação e assimilação do CO₂ no ciclo de Calvin. Além disso, as clorofilas podem sofrer os danos causados pelas espécies reativas de oxigênio (ROS) (GAN, 2007), reduzindo ainda mais a atividade fotossintética. À medida que aumenta o estresse oxidativo em função do tempo de exposição à luz, os tilacóides são danificados e perdem sua capacidade de realizar fotossíntese, devido a danos na maquinaria fotossintética (TRIPATHY et al., 2007).

O sulfentrazone pertence ao grupo das ariltriazolinonas e possui solubilidade de 780 mg.L⁻¹ (pH 7), pressão de vapor de 1x10⁻⁹ mmHg a 25 °C, constante de dissociação (pKa) igual a 6,56 e coeficiente de partição (Kow) igual a 9,8 (pH₇). É um ácido com ionização em solução aquosa, em função do seu pKa e do índice pH do meio (WEBER, 1970; TOMLIN, 1994).

2.2 FITORREMEDIAÇÃO

O processo chamado de fitorremediação consiste no método de descontaminação de solo ou água por meio da utilização de plantas. As espécies utilizadas para fitorremediar devem ser tolerantes aos contaminantes e possuir habilidade para remover, extrair e/ou mesmo mineralizá-los no ambiente (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000). Ao longo dos últimos anos, foram realizados diversos trabalhos (CARMO et al., 2008; PROCÓPIO et al., 2008; BELO et al., 2011; MADALÃO et al., 2012) que visam a utilização dessa técnica em áreas contaminadas por agroquímicos, como os herbicidas. Muitos desses contaminantes possuem características que lhes permitem permanecer no ambiente por longos períodos.

A presença de resíduos de herbicidas no solo causa grande impacto ambiental que pode ser responsável por perdas econômicas, quando afeta culturas sensíveis, além da redução na biodiversidade (REIS et al., 2008; ROBINSON, 2008). Contudo, também pode ocorrer a lixiviação desses herbicidas, podendo então contaminar os cursos hídricos, e causar efeitos tóxicos em organismos aquáticos como fitoplânctons e peixes (SCHEIL et al., 2009).

A fitorremediação pode ser usada em solos contaminados com substâncias orgânicas ou inorgânicas, como metais pesados, elementos contaminantes, hidrocarbonetos de petróleo, agroquímicos, explosivos, solventes clorados e subprodutos tóxicos da indústria (CUNNINGHAM, 1996). Contudo, é mais difícil trabalhar com contaminantes orgânicos, em razão da diversidade molecular, da complexidade de análise e das constantes transformações a que estão sujeitos. Os metais pesados, por exemplo, são mais facilmente quantificados e raramente formam metabólitos intermediários no solo, como ocorre na biodegradação dos

contaminantes orgânicos (CUNNINGHAM, 1996). Assim, as pesquisas com compostos orgânicos contaminantes de solo exigem técnicas especializadas e de custo elevado, envolvendo o uso de elementos marcados e sofisticada instrumentação analítica (PIRES, 2003).

A fitorremediação de solos contaminados com herbicidas é dependente da interação entre três fatores: fisiologia da planta, características físico-químicas do solo e composição química do herbicida. Podendo ser dividida em algumas classes que, segundo Souza, (2014) são classificadas da seguinte maneira:

- fitoestabilização – o contaminante é complexado nos tecidos radiculares diminuindo a sua movimentação no solo,
- fitoestimulação – o contaminante, geralmente orgânico, é degradado por micro-organismos que se desenvolvem na região da rizosfera devido às condições particulares existentes,
- fitovolatilização – o contaminante, uma vez absorvido, tem seu estado físico alterado para uma forma gasosa e assim é volatilizado, podendo ocorrer tanto para contaminantes orgânicos como inorgânicos,
- fitodegradação – processo semelhante à fitoestimulação, mas que ocorre em partes aéreas,
- fitoextração – o contaminante é absorvido e a maior parte é transportada para a parte aérea, o que possibilita a colheita e remoção efetiva do contaminante do meio ambiente.

Uma das características necessárias para a realização da fitorremediação é selecionar espécies remediadoras que sejam tolerantes a altos níveis do contaminante no ambiente a ser remediado. Tal tolerância pode ser resultante de processos como a translocação diferencial de compostos orgânicos para outros tecidos da planta, com subsequente volatilização, ou da degradação parcial ou completa, com transformação em compostos menos tóxicos, combinados e/ou ligados nos tecidos das plantas (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000).

A literatura mostra que fitorremediação possui uma série de vantagens (COLE et al., 1995; CUNNINGHAM et al., 1996; VOSE et al., 2000), que são:

- menor custo em relação as técnicas tradicionalmente utilizadas envolvendo a remoção do solo para tratamento *ex situ*;

- na maioria dos casos, os equipamentos e suprimentos empregados no programa de fitorremediação são os mesmos utilizados na agricultura. Logo, quando a fitorremediação é implantada em áreas agrícolas, o custo deve ser ainda menor;
- os compostos orgânicos podem ser degradados a CO₂ e H₂O, removendo toda a fonte de contaminação, não havendo, nessa situação, a necessidade de retirada das plantas fitorremediadoras da área contaminada. Esta situação não é válida para metais pesados;
- plantas são mais fáceis de ser monitoradas do que micro-organismos, por exemplo; as propriedades biológicas e físicas do solo são mantidas e, não raro, até melhoradas;
- incorporação de matéria orgânica ao solo, quando não há necessidade de retirada das plantas fitorremediadoras da área contaminada;
- fixação de nitrogênio atmosférico, no caso de leguminosas;
- plantas ajudam no controle do processo erosivo, eólico e hídrico. Nesse último caso, evitam o carreamento de contaminantes com a água e com o solo e, por conseguinte, reduzem a possibilidade de contaminação de lagos e rios;
- pode-se considerar, também, que a planta reduz o movimento descendente de água contaminada de camadas superficiais do solo para o lençol freático;
- plantas são mais favoráveis, esteticamente, do que qualquer outra técnica de biorremediação e podem ser implementadas com mínimo distúrbio ambiental, evitando escavações e tráfego pesado;
- utiliza energia solar para realizar os processos; e tem alta probabilidade de aceitação pública.

A técnica da fitorremediação oferece muitos aspectos positivos, mas também existem inconvenientes. Existem limitações na biorremediação, de compostos orgânicos, como petróleo, agroquímicos, segundo Macek et al. (2000), as principais são:

- dificuldade na seleção de plantas para fitorremediação, principalmente em relação à descontaminação de herbicidas de amplo espectro de ação ou em misturas no solo;
- o tempo requerido para obtenção de uma despoluição satisfatória pode ser longo (usualmente mais de uma estação de crescimento);
- o contaminante deve estar dentro da zona de alcance do sistema radicular;
- clima e condições edáficas podem restringir o crescimento de plantas fitorremediadoras;

- elevados níveis do contaminante no solo podem impedir a introdução de várias plantas na área contaminada;
- as plantas podem metabolizar os compostos, o que não quer dizer que eles serão completamente mineralizados. Em alguns casos, os metabólitos podem ser mais problemáticos que os compostos originais;
- potencial de contaminação da cadeia alimentar;
- necessidade de disposição da biomassa vegetal, quando ocorre a fitoextração de poluentes não-metabolizáveis ou metabolizados a compostos também tóxicos;
- possibilidade de uma planta fitorremediadora tornar-se planta daninha; e
- melhoria nas condições do solo pode ser requerida, incluindo a quebração do contaminante para facilitar sua absorção pelas plantas, devido à quebra de pontes de ligação com partículas do solo.

Em um levantamento de custos feito por Lasat e Schnoor, (2000), os custos da fitorremediação são duas a quatro vezes menores do que os custos para escavação e aterramento do solo contaminado. Utilizando-se fitorremediação para limpar um hectare de solo em profundidade de 50 cm, o custo será de US\$ 60.000-100.000, comparado com pelo menos US\$ 400.000 para escavação e armazenamento do solo (LASAT, 2000), e US\$ 100.000 - 250.000 para cobertura do solo (SCHNOOR, 2002).

A utilização de plantas fitorremediadoras pode devolver o potencial agrícola a solos caracterizados como inaptos ao cultivo devido elevados teores de determinados resíduos tóxicos. Diversos estudos têm sido realizados no intuito de determinar a eficiência da fitorremediação sobre alguns herbicidas de longo efeito residual que representam riscos de contaminação (ASSIS et al., 2010).

2.3 FITORREMEIADORAS

2.3.1 *Mucuna aterrima*

A mucuna-preta (*Mucuna aterrima*) é uma planta anual ou bianual, liana, de ampla adaptação, pertencente à família Fabaceae, pode atingir altura de 0,5 a 1,0 m, com potencial de produção de massa vegetal seca de 6 a 8 t ha⁻¹ (WUTKE, 1993; FAHL et al., 1998). Apresenta desenvolvimento vegetativo vigoroso e acentuada rusticidade, adaptando-se bem às condições de deficiência hídrica e de temperaturas altas. Floresce e frutifica de maneira variável, porém não possui reação fotoperiódica (AMABILE et al., 2000).

Nessa espécie o crescimento inicial é extremamente rápido e, aos 58 dias após a emergência, tem-se a cobertura de 99% da superfície do solo (FAVERO et al, 2001). Além disso, exerce forte e persistente ação inibitória sobre a tiririca (*Cyperus rotundus*) e o picão-preto (*Bidens pilosa*), além de ser má hospedeira e não multiplicadora dos nematóides de galhas (*Meloidogyne incognita* e *M. javanica*) (Wutke, 1993) e também do nematóide do cisto (*Heterodera* spp.).

O mecanismo utilizado pela *M. aterrima* para auxiliar na fitorremediação do solo é a fitoextração. Esse mecanismo consiste na extração e acúmulo dos contaminantes em seus tecidos, preferencialmente na parte aérea (ANDRADE et al., 2007). No caso da fitoextração, busca-se utilizar plantas denominadas hiperacumuladoras, as quais apresentam a capacidade de acumular em seus tecidos níveis contaminantes até cem vezes superiores a uma planta comum (LASAT, 2000).

2.3.2 *Crotalaria juncea*

A *Crotalaria juncea* é uma planta anual, arbustiva, pertencente à família Fabaceae, de crescimento ereto e determinado podendo atingir de 3,0 a 3,5 m de altura, com potencial de produção de matéria seca em torno de 15 a 20 t ha⁻¹. Esta espécie é originária da Índia, com ampla adaptação às regiões tropicais, as plantas produzem fibras e celulose de alta qualidade, próprias para a indústria de papel e outros fins. Recomendada para adubação verde, em cultivo isolado, intercaladas a perenes, na reforma de canavial ou em rotação com culturas graníferas, é uma das espécies leguminosas de mais rápido crescimento inicial (WUTKE, 1993; FAHL et al., 1998).

Em trabalho realizado com a finalidade de selecionar espécies tolerantes ao sulfentrazone, para fitorremediação, dentre as 25 espécies testadas, Madalão (2011) identificou, como uma das mais promissoras, a *Crotalaria juncea*.

2.3.3 *Dolichos lablab*

O lablabe (*D. lablab* L.), é uma planta anual ou bianual pertencente à família Fabaceae, de origem africana, cultivada amplamente em regiões pan-tropicais. É uma planta robusta de hábito de crescimento indeterminado que se desenvolve bem tanto em solos arenosos como em solos argilosos, com pH variando entre 4,5 – 7,5. Existem relatos

científicos que *D. lablab* é uma planta relativamente tolerante a seca e estresse salino, comparada a outras leguminosas (MATEUS et al., 2006; SOUZA, 2014).

É considerada uma das principais espécies usadas como adubação verde, devido apresentarem características como ser tolerante às geadas, pode atingir altura de 0,5 a 1,0 m, crescimento rápido sistema radicular denso e profundo e tem potencial de produção de massa seca de 5 a 7 t ha⁻¹. A espécie é muito usada como planta para realizar a cobertura de solo, tendo um grande potencial a ser uma espécie de planta fitorremediadora (MATEUS et al., 2006; PROCÓPIO, 2004).

Em trabalhos realizados por Belo et al. (2011), Madalão et al. (2013) o *D. lablab* apresentou tolerância aos herbicidas estudados naquela ocasião, sendo uma espécie recomendada como fitorremediadora.

2.4 *Sorghum bicolor*

O sorgo (*Sorghum bicolor*) é uma espécie originária da África, possui adaptação a diferentes condições ambientais desfavoráveis em relação à maioria dos cereais. Característica esta devido ser uma planta que possui metabolismo C4, sendo uma espécie de dias curtos e com alta taxa fotossintética, motivo esse que é uma espécie plantada em diversas regiões do mundo (OLIVEIRA, 2015).

Essa espécie é tolerante a altas temperaturas e à seca, sendo as melhores condições de temperaturas entre 26 e 30° C, apresenta sistema radicular profundo e ramificado, o que aumenta a eficiência na extração de água da solução de solo. As folhas possuem um bom mecanismo de transpiração que evita a perda de água característica essa de plantas de metabolismo C4 (ROSA, 2012).

Alguns fatores como temperatura, radiação solar e precipitação, influenciam diretamente no desenvolvimento do sorgo, influenciando na produção de grãos e matéria seca, podendo afetar a taxa de crescimento e desenvolvimento das plantas (OLIVEIRA, 2015).

O sorgo é uma espécie de gramínea que pode ser utilizada para realizar a substituição do milho em forma de rações concentradas, misturas proteinadas ou silagem por ser altamente tolerante aos veranicos e a elevadas temperaturas (OLIVEIRA, 2015).

A escolha do sorgo como planta bioindicadora justifica-se devido a trabalhos realizados por Belo et al. (2011), onde constatou a altíssima taxa de intoxicação do sorgo, milheto entre outras gramíneas ao herbicida sulfentrazone.

3 METODOLOGIA

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada Instituto Federal de Minas Gerais – Campus São João Evangelista (18° 55' 182"S, 42° 75' 349" W e altitude de 720 m) entre os meses de abril a agosto de 2017. Foram avaliadas três espécies que são utilizadas como adubo verde, sendo a *Mucuna aterrima*, *Crotalaria juncea* e *Dolichos lablab*.

O delineamento adotado no experimento foi em blocos ao acaso, em arranjo fatorial 4 x 3, sendo quatro doses de herbicidas e três comunidades de plantas, com cinco repetições. Foram utilizadas doses crescentes do herbicida (0; 1; 2,0 e 4,0 l.ha⁻¹). As comunidades foram representadas pela Comunidade 1 – espécies de adubos verdes; Comunidade 2 – espécies espontâneas do banco de sementes do solo; Comunidade 3 – solo mantido sem espécies vegetais. Cada unidade experimental foi constituída por um vaso de polietileno com furos na parte inferior, preenchidos com 25 dm³ de solo.

Como substrato para o crescimento das plantas, utilizou-se solo coletado de uma área previamente corrigida e peneirado em malha de quatro milímetros. Uma amostra foi coletada e posteriormente analisada quimicamente no Laboratório de Análises de Solos do IFMG-SJE (Tabela 1).

Tabela 1 - Composição química da camada arável (0 - 20cm) do solo utilizado no experimento.

Ph	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	(t)	(T)	V	m	MO	P-rem
--mg.dm ⁻³ --		----- cmolc.dm ⁻³ -----							----- % -----	----- dag.kg ⁻¹ ---			
5,9	18,64	60	2,05	0,95	0	2,03	3,15	3,15	5,18	60,83	0	0,87	42,94

Após o enchimento e umedecimento dos vasos, foi aplicado em pré-emergência o herbicida sulfentrazone, nas doses determinadas utilizando um pulverizador costal elétrico provido de barra de pulverização contendo um bico tipo leque Teejet 110.02 e com volume de aplicação de 150 L.ha⁻¹. A aplicação do sulfentrazone foi realizada do lado externo da casa de vegetação para redução dos riscos de deriva do herbicida e contaminação do ambiente. A barra do pulverizador foi posicionada 0,5 m acima da borda superior dos vasos. Após 72 h da aplicação dos herbicidas os vasos foram arranjados em blocos no interior da casa de vegetação onde foram mantidos até o final do experimento.

Todas as espécies foram semeadas três dias após a aplicação dos herbicidas, sendo utilizadas cinco sementes de cada espécie. Após a germinação foram desbastadas, deixando

apenas uma planta de *Mucuna aterrima*, *Crotalaria juncea* e *Dolichos lablab* formando assim a comunidade de espécies fitorremediadoras. A segunda comunidade foi estabelecida com as espécies de plantas daninhas que germinaram. A terceira comunidade foi estabelecida com a capina semanal, mantendo a superfície do vaso livre de plantas. A escolha das espécies foi baseada em experimentos preliminares de tolerância aos herbicidas (CARMO et al., 2008a; BELO et al., 2011).

A fitotoxicidade do herbicida nas plantas fitorremediadoras foi avaliada aos 15, 30 e 45 dias após a semeadura (DAS). Para avaliação da fitotoxicidade do herbicida, foram atribuídas notas de 0 a 100, em que 0 representou ausência de sintomas e 100 a morte da planta (ALAM, 1974) (Tabela 2). Aos 60 DAS também foi avaliada a massa fresca e seca da parte aérea das espécies vegetais (MFPA e MSPA). Para determinar a massa de matéria seca da parte aérea das espécies vegetais, o material foi seco em estufa com circulação de ar forçada (65 ± 2 °C) por 72 horas.

Tabela 2 - Avaliação de fitotoxicidade de acordo com a escala de Alam (1974).

%	SINTOMAS	DESCRIÇÃO DOS SINTOMAS
0	Nenhum	Nenhum sintoma visível
3	Duvidoso	Parece apresentar algum sintoma
5	Leve	Sintoma leve com pequeno amarelecimento
10	Definido	Sintoma claro com amarelecimento visível
15	Definido sem dano econômico	Amarelecimento, clorose, engruvinhamento
20	Aceitável	Amarelecimento, clorose mais intensa, engruvinhamento
30	Limite aceitável	Aceitável comercialmente sem dano econômico
40	Severo	Clorose, engruvinhamento, necrose, queima, redução do porte
60	Muito Severo	Redução de stand com 25% de morte
80	Extremamente Severo	75% de morte de plantas
100	Total Destruição	100% de morte de plantas

Foram necessárias capinas semanais, contudo, as daninhas germinadas nas comunidades um e três, foram apenas arrancadas dos vasos e devolvidas à superfície dos mesmos com o intuito de não interferir nas doses dos herbicidas contidas no solo. Também foi realizada a movimentação dos vasos de cada bloco a cada cinco dias para evitar o máximo de interferência externa, devido às condições da casa de vegetação não apresentar uniformidade quanto à radiação e temperatura interna. A irrigação foi realizada manualmente em pratos na base dos vasos e monitorada diariamente, irrigando somente os vasos que apresentavam os

pratos secos. Após a coleta das plantas fitorremediadoras foi realizado cálculos de adubação para a cultura do sorgo, *Sorghum bicolor* (ALVES et al., 1999).

A adubação para a cultura do sorgo foi nas proporções de 0,56 g.vaso⁻¹ de (NH₂)₂CO, 5,55 g.vaso⁻¹ de P₂O₅ e 1,5 g.vaso⁻¹ de KCl. Logo após a adubação foram semeadas sementes de sorgo (dez sementes por vaso), espécie sensível ao sulfentrazone. Foi avaliado o Índice de Velocidade de Germinação (IVG) do sorgo com os dados referentes ao número de plântulas germinadas até os 20 DAS.

Aos 15, 30 e 45 DAS, o sorgo foi avaliado quanto aos sintomas de toxicidade nas plantas. Para a avaliação da fitotoxicidade, foram atribuídas notas de 0 a 100, de acordo com os sintomas de intoxicação observados na parte aérea das plantas, em que 0 representava ausência de sintomas e 100 a morte da planta (ALAM, 1974) (Tabela 2). Aos 45 DAS foi avaliada a biomassa fresca e seca da parte aérea. Para determinar a massa seca da parte aérea, o material colhido foi colocado em estufa com circulação forçada de ar (70 ± 2 °C) por 72 horas.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias dos tratamentos, quando significativas, comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando-se o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2003).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ÍNDICE DE FITOTOXICIDADE AVALIADO PARA AS FITORREMEIADORAS

Foi observado efeito significativo de dose, fitorremediadora, tempo e das interações dose x fitorremediadora e fitorremediadora x tempo no índice de fitotoxicidade das plantas ($p < 0,05$) (Tabela 3).

Tabela 3 - Resumo da análise de variância do índice de toxicidade avaliado nas espécies fitorremediadoras cultivado em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.

FV	GL	QM
		TOXICF (%)
Bloco	4	798,4064
Dose	3	4333,7238*
Fito	2	17401,3526*
Tempo	2	8244,9156*
Dose x Fito	6	2527,6610*
Dose x Tempo	6	1159,7080 ^{ns}
Fito x Tempo	4	2653,8209*
Dose x Fito x Tempo	12	577,2765 ^{ns}
Erro	140	883,935
Total	179	
CV (%)		132,45

ns: não significativo pelo teste F a 5 %; *: significativo a 5 % pelo teste F; TOXICF: Toxicidade do herbicida nas fitorremediadoras.

Dentre as três espécies de adubos verdes, a *Crotalaria juncea* apresentou menor índice de toxicidade, com médias iguais em todas as doses testadas (Tabela 4). Já a *Mucuna aterrima* apresentou toxicidade 23x maior que a *Crotalaria juncea* na dose de 2 l.ha⁻¹, acompanhada do *Dolichos lablab* com índice 20,8x maior em relação a *Crotalaria juncea* na mesma dose (Tabela 4).

Tabela 4 - Toxicidade das plantas fitorremediadoras cultivado em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.

TRATAMENTOS (l.ha ⁻¹)	<i>Mucuna aterrima</i>	<i>Crotalaria juncea</i>	<i>Dolichos lablab</i>
0	18,27 Aa	1,13 Aa	20,93 Aa
1	27,33 Aba	2,18 Aa	14,42 Aba
2	50,11 Bb	2,18 Aa	45,38 BCb
4	22,84 Aba	6,51 Aa	58,07 Cb

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

Ao analisar o efeito da interação dose x tempo foi observado para as doses de 1 e 4 l.ha⁻¹ um aumento gradativo na intoxicação até 30 dias após aplicação do herbicida, tendendo a reduzir o nível de toxicidade aos 45 dias, demonstrando um potencial fitorremediador para o herbicida sulfentrazone (Tabela 5). Para a dose de 2 l.ha⁻¹ o efeito de intoxicação foi crescente ao decorrer do tempo (Tabela 5).

Tabela 5 - Toxicidade das plantas fitorremediadoras cultivado em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.

TRATAMENTOS (l.ha ⁻¹)	15 Dias	30 Dias	45 Dias
0	7,64 Aa	24,91 Aa	7,78 Aa
1	1,18 Aa	22,69 Aa	20,07 ABa
2	7,47 Aa	41,96 Ab	48,24 ABb
4	20,40 Aa	35,96 Aa	31,07 Ba

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

Aos 15, 30 e 45 dias a maior tolerância para o sulfentrazone foi verificada na *C. juncea*, as médias foram as menores no intervalo de tempo avaliado e não diferiram entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (Tabela 6). Avaliando o período de 15 dias após a aplicação do herbicida, as médias não diferiram entre si, porém o *D. lablab* apresentou maior média de toxicidade, com 22,75%, sendo 7x maior a sua toxicidade em relação a *M. aterrima* e 15,2x maior que a *C. juncea* (Tabela 6). Já no período de 30 dias a *M. aterrima* apresentou maior índice de toxicidade, 49,57%, sendo 17,2x maior que a *C. juncea* e cerca de 16% a mais que o *D. lablab* (Tabela 6). No período de 45 dias a *M. aterrima* continuou na classe das que apresentaram maior toxicidade, 7,8x maior que a *C. juncea*, porém o *D. lablab* apresentou maior toxicidade com valor 8,6x maior que a *C. juncea* e 11% a mais que a *M. aterrima*, mas as médias não diferiram entre si (Tabela 6).

Tabela 6 - Toxicidade das plantas fitorremediadoras cultivado em solo tratado com o herbicida sulfentrazone aos 15, 30 e 45 dias após aplicação do herbicida.

Fitorremediadoras	15 Dias	30 Dias	45 Dias
<i>Mucuna aterrima</i>	3,27 Aa	49,57 Ab	36,08 Bb
<i>Crotalaria juncea</i>	1,50 Aa	2,88 Ba	4,62 Aa
<i>Dolichos lablab</i>	22,75 Aa	41,68 Ba	39,67 Ba

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

Para a *M. aterrima*, no período compreendendo entre 15 e 30 dias o índice de toxicidade foi crescente, porém no período de 45 dias, a mesma apresentou uma tendência de redução de toxicidade (Tabela 6). A situação anterior ocorreu também para o *D. lablab* em

que no período de 15 dias para 30 dias, o índice de toxicidade foi crescente, porém no período de 45 dias a mesma apresentou índice de toxicidade menor, com efeito de fitorremediação semelhante a *M. aterrima*, demonstrando que ambas as espécies apresentam potencial fitorremediador (Tabela 6).

Em trabalho realizado com a finalidade de selecionar espécies fitorremediadoras tolerantes ao sulfentrazone, dentre as 25 espécies testadas, Madalão (2011) identificou, como uma das mais promissoras, a *Crotalaria juncea*, resultado semelhante aos observados no presente trabalho. Madalão et al. (2013) ainda constatou que dentre as espécies avaliadas, *D. lablab*, *C. Ensiformis* e *C. juncea* apresentaram os menores sintomas de fitotoxicidade em relação ao sulfentrazone.

Belo et al. (2011), em trabalho preliminar, descrevem as espécies *Helianthus annuus* e *D. lablab* como potencialmente fitorremediadoras de solos contaminados com o sulfentrazone.

4.2 ALTURA DAS FITORREMEIADORAS

Foi observado efeito significativo das fitorremediadoras e da interação dose x fitorremediadora na altura das plantas ($p < 0,05$) (Tabela 7).

Tabela 7 - Resumo da análise de variância da altura avaliada das fitorremediadoras cultivado em solos contaminados por sulfentrazone.

FV	GL	QM
		ALTF
Bloco	4	3613,5298
Dose	3	2549,6944 ^{ns}
Fito	2	110862,2509*
Dose x Fito	6	19003,1322*
Erro	44	2179,7179
Total	59	
CV (%)		38,37

ns: não significativo pelo teste F a 5 %; *: significativo a 5 % pelo teste F; ALTF: Altura da parte aérea das fitorremediadoras

Analisando as espécies dentro das doses testadas, percebe-se que a *M. aterrima* na dose de 4 l.ha⁻¹ apresentou altura cerca de 2x menor em relação às outras doses, ficando evidente que uma concentração do herbicida sulfentrazone acima da recomendada que é de 2 l.ha⁻¹, interferem no crescimento da espécie (Tabela 8). Para a *C. juncea* as médias de altura não diferiram entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (Tabela 8). Já para o *D.*

lablab a maior altura foi constatada na dose de 4 l.ha⁻¹, média essa que segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade não diferiu da dose de 2 l.ha⁻¹ (Tabela 8).

Belo et al. (2011) relata o potencial das espécies *C. ensiformis* e *Dolichos lablab*, como espécies com potencial fitorremediador, em relação ao herbicida sulfentrazone. Foi observado também que, à medida em que as plantas crescem, sua capacidade de remediar é aumentada, notadamente pela maior capacidade de absorção (MADALÃO et al, 2012).

Tabela 8 - Altura das plantas fitorremediadoras cultivado em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.

TRATAMENTOS l.ha ⁻¹	ALTF, (cm) <i>Mucuna aterrima</i>	ALTF, (cm) <i>Crotalaria juncea</i>	ALTF, (cm) <i>Dolichos lablab</i>
0	205,16 Bb	73,95 Aa	47,067 Aa
1	262,26 Ba	58,83 Aa	68,30 Aa
2	237,88 Bb	52,07 Aa	116,80 Aba
4	109,37 Aab	48,35 Aa	180,00 Bb

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

4.3 DIÂMETRO DE CAULE DAS PLANTAS DE FITORREMEIADORAS

Foi observado efeito significativo de dose, fitorremediadora e na interação entre os dois fatores no diâmetro das plantas ($p < 0,05$) (Tabela 9).

Tabela 9 - Resumo da análise de variância do diâmetro avaliada das fitorremediadoras cultivado em solos contaminados por sulfentrazone.

FV	GL	QM
		DIÂMETRO (mm)
Bloco	4	1,57
Dose	3	2,33*
Fito	2	14,58*
Dose x Fito	6	1,79*
Erro	44	0,32
Total	59	
CV (%)		13,43

ns: não significativo pelo teste F a 5 %; *: significativo a 5 % pelo teste F; ALTP: Altura da parte aérea das fitorremediadoras.

O maior diâmetro observado foi na fitorremediadora *Dolichos lablab* na dose 2 l.ha⁻¹, sendo este de 5,5 mm, apresentando diferença superior para a testemunha de 21,3% (Tabela 10). O segundo maior diâmetro ocorreu na mesma fitorremediadora, apresentando 5 mm, porém na dose 4 l.ha⁻¹, 13,4% superior à testemunha (Tabela 10). Esse fato demonstra um indício do adubo verde em remediar o resíduo do herbicida, mostrando que o mesmo não foi

suficiente para afetar o desenvolvimento do *D. lablab*, que apresentou maior diâmetro em relação às demais fitorremediadoras (Tabela 10).

Nos trabalhos realizados por Belo et al. (2011) e Moraes et al. (2007), *D. lablab* também foi tolerante ao sulfentrazone. Essa tolerância possibilita o maior crescimento da planta e conseqüentemente a mesma apresenta um maior diâmetro, fato observado neste trabalho.

Tabela 10 - Diâmetro das plantas fitorremediadoras cultivado em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.

TRATAMENTOS (g)	DIÂM, (mm)	DIÂM, (mm)	DIÂM, (mm)
	<i>Mucuna aterrima</i>	<i>Crotalaria juncea</i>	<i>Dolichos lablab</i>
0	3,90 Aa	3,50 Ba	4,33 Aa
1	4,90 Bb	3,33 Ba	4,50 Ab
2	4,60 Aba	4,00 Ba	5,50 ABb
4	4,50 ABb	2,00 Aa	5,00 Bb

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

4.4 MASSA FRESCA E SECA DA PARTE AÉREA DAS LEGUMINOSAS

Foi observado efeito significativo de dose, fitorremediadora, bem como, interação entre dose e fitorremediadora sobre o acúmulo da MFPA das plantas ($p < 0,05$) (Tabela 11). Para MSPA foi observado apenas efeito das fitorremediadoras ($p < 0,05$) (Tabela 11).

Tabela 11 - Resumo da análise de variância com os dados dos atributos avaliados das espécies fitorremediadoras sulfentrazone.

FV	GL	QM	
		MFPAF	MSPAF
Bloco	4	202,1989	56,45
Dose	3	1274,2966*	135,30 ^{ns}
Fito	2	5989,9970*	750,89*
Dose x Fito	6	1268,1182*	80,12 ^{ns}
Erro	44	428,4587	55,78
Total	59		
CV (%)		63,95	88,71

ns: não significativo pelo teste F a 5 %; *: significativo a 5 % pelo teste F; MFPAF: Massa fresca parte aérea fitorremediadora; MSPAF: Massa seca da parte aérea das fitorremediadoras.

Para a *M. aterrima* houve um maior acúmulo de massa fresca na dosagem de 1 l.ha⁻¹, com 71,78g, 2,9x maior que na testemunha, sendo também o maior acúmulo em relação às outras fitorremediadoras e dosagens (Tabela 12). Para a *C. juncea* o acúmulo de massa fresca foi maior na dosagem de 4 l.ha⁻¹, apresentando 17,64g, 48,2% superior a testemunha (Tabela 12). Já para o *D. lablab* o acúmulo de massa fresca foi maior na dose de 2 l ha⁻¹, apresentando 60,32g, 3,2x maior que a testemunha (Tabela 12).

A *M. aterrima* teve melhor adaptação às condições de cultivo na casa de vegetação com maior capacidade de crescimento na presença de resíduos do sulfentrazone, indicando potencial para fitorremediação desse herbicida, explicado pelos maiores índices de acúmulo de massa fresca (Tabela 12).

Tabela 12 - Acúmulo de massa fresca da parte aérea de fitorremediadoras cultivada em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.

TRATAMENTOS (l.ha ⁻¹)	MFPAF, (g)	MFPAF, (g)	MFPAF, (g)
	<i>Mucuna aterrima</i>	<i>Crotalaria juncea</i>	<i>Dolichos lablab</i>
0	25,08 Aa	11,90 Aa	18,60 Aa
1	71,78 Bb	7,76 Aa	33,95 Aba
2	46,57 ABb	6,83 Aa	60,32 Bb
4	30,30 Aa	17,64 Aa	38,25 Aba

MFPAF: Massa Fresca da parte aérea das fitorremediadoras. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Para a produção de massa seca foi observado que a fitorremediadora *M. aterrima* acumulou 19,71 g.planta⁻¹ de massa seca na dosagem de 2 l.ha⁻¹, sendo 33% maior que na dose de 0 l.ha⁻¹ (Tabela 13). Para a *C. juncea* e o *D. lablab* as médias de acúmulo de massa seca não diferiram entre si (Tabela 13).

Segundo Madalão et al. (2013) as espécies *C. juncea*, *C. ensiformis* e *D. lablab* apresentaram os menores níveis de redução no acúmulo de massa, indicando potencial de utilização dessas espécies em programas de fitorremediação para sulfentrazone.

Tabela 13 - Acúmulo de massa seca da parte aérea de fitorremediadoras cultivada em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.

TRATAMENTOS (l.ha ⁻¹)	MSPAF, (g)	MSPAF, (g)	MSPAF, (g)
	<i>Mucuna aterrima</i>	<i>Crotalaria juncea</i>	<i>Dolichos lablab</i>
0	13,12 ABa	1,66 Aa	2,78 Aa
1	14,62 ABba	1,58 A	8,13 Aab
2	19,71 Bb	1,03 Aa	14,65 Ab
4	5,45 Aa	0,20 Aa	9,68 Aa

MSPAF: Massa Seca da parte aérea das fitorremediadoras. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

4.5 ÍNDICE DE VELOCIDADE DE GERMINAÇÃO DO SORGO (IVG)

Não foi observada efeito das doses do herbicida, comunidades (trat) e interação entre dose e fitorremediadora no índice de velocidade de germinação do sorgo ($p < 0,05$) (Tabela 14).

Tabela 14 - Resumo da análise de variância do índice de velocidade de germinação avaliado na cultura do sorgo cultivado em sucessão a espécies fitorremediadoras.

FV	GL	QM
		IVG
Bloco	4	425,7185
Dose	3	330,8891 ^{ns}
Trat	2	99,5115 ^{ns}
Dose x Trat	6	658,6028 ^{ns}
Erro	44	410,3583
Total	59	
CV (%)		24,88

ns: não significativo pelo teste F a 5 %; *: significativo a 5 % pelo teste F. IVG: Índice de velocidade de germinação.

Observou-se uma tendência à redução no IVG das plantas submetidas à aplicação de doses crescentes do sulfentrazone. Os resíduos de sulfentrazone presentes no solo não alteraram a velocidade de germinação das sementes do sorgo, denotando um possível potencial das fitorremediadoras para extração do herbicida, observando que não ocorreram diferenças significativas entre as médias na comunidade de adubos verdes, comunidade nativa e comunidade capinada (Tabela 15).

Tabela 15 - Índice de velocidade de germinação do sorgo cultivado em sucessão a diferentes comunidades de plantas.

Comunidades	IVG
Comunidade adubo verde	83,15 A
Comunidade nativa	82,22 A
Comunidade capinada	78,91 A

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

4.6 MATÉRIA FRESCA E SECA DA PARTE AÉREA DO SORGO

Foi observado efeito significativo de dose sobre o acúmulo da MFPA e MSPA do sorgo ($p < 0,05$), não sendo significativo para comunidades (trat) e interação entre dose e comunidades (trat) (Tabela 16).

Tabela 16 - Resumo da análise de variância com os dados dos atributos avaliados na cultura do sorgo cultivado em sucessão a espécies fitorremediadoras.

FV	GL	QM	
		MFPAS	MSPAS
Bloco	4	247,2639	2,1837
Dose	3	2845,3525*	27,5597*
Trat	2	85,8816 ^{ns}	0,7947ns
Dose x Trat	6	214,9657 ^{ns}	2,2305ns
Erro	44	115,9144	1,2690
Total	59		
CV (%)		45,95	46,36

ns: não significativo pelo teste F a 5 %; *: significativo a 5 % pelo teste F; MFPAS: Massa fresca parte aérea do sorgo; MSPAS: Massa Seca da parte aérea do sorgo.

As plantas de sorgo cultivadas em sucessão a comunidade nativa apresentaram maior produção de massa fresca na dose de 1 l.ha⁻¹, com 38,26 g.planta⁻¹, cerca de 16,9% superior a testemunha (Tabela 17). O segundo melhor acúmulo de massa fresca foi na comunidade de adubo verde dentro da dose de 1 l.ha⁻¹, com 37,54 g.planta⁻¹, cerca de 2,5% superior a testemunha (Tabela 17). Pode-se observar que na dose de 4 l.ha⁻¹, o acúmulo de massa fresca foi menor para todas as três comunidades testadas, sendo que para o adubo verde foi de 7,54 g.planta⁻¹, comunidade nativa com 5 g.planta⁻¹ e a comunidade capinada com 0,42 g.planta⁻¹ (Tabela 17). Analisando as diferenças entre as comunidades, na dose 4 l.ha⁻¹ em relação a testemunha, a comunidade de adubo verde acumulou 4,9x g.planta⁻¹ a menos, a comunidade nativa acumulou 6,6x a menos e a comunidade capinada acumulou 79,2x a menos (Tabela 17).

Tabela 17 - Acúmulo de massa fresca da parte aérea do sorgo cultivada em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.

TRATAMENTOS (l.ha ⁻¹)	MFPAS, (g)	MFPAS, (g)	MFPAS, (g)
	Adubo Verde	Comunidade Nativa	Comunidade Capinada
0	36,62 Ba	32,76 BCa	33,26 Ba
1	37,54 Ba	38,26 Ca	22,42 Ba
2	20,90 Aba	16,38 ABa	30,08 Ba
4	7,54 Aa	5,00 Aa	0,42 Aa

MFPAS: Massa Fresca da parte aérea das fitorremediadoras. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

O maior acúmulo de massa seca foi observado na comunidade nativa, na dose de 1 l.ha⁻¹, com 4,05 g.planta⁻¹, cerca de 13% superior a testemunha (Tabela 18). O segundo maior acúmulo de massa seca foi na comunidade de adubo verde na dose de 1 l.ha⁻¹, com 3,71 g.planta⁻¹, cerca de 4,9% melhor que a testemunha (Tabela 18). Pode-se observar que na dose de 4 l.ha⁻¹, o acúmulo de massa seca foi menor para todas as três comunidades testadas, sendo que para o adubo verde foi de 0,84 g.planta⁻¹, comunidade

nativa com $0,60 \text{ g.planta}^{-1}$ e a comunidade capinada com $0,07 \text{ g.planta}^{-1}$ (Tabela 18). Analisando as diferenças entre as comunidades, na dose 4 l.ha^{-1} em relação a testemunha, a comunidade de adubo verde acumulou $4,2x \text{ g.planta}^{-1}$ a menos, a comunidade nativa $5,8x$ a menos, e a comunidade capinada $46,4x$ a menos (Tabela 18).

Os resultados apresentados demonstram que a comunidade de adubo verde e comunidade nativa conseguiram proporcionar melhores condições para o desenvolvimento do sorgo, provavelmente por realizar uma maior remediação do herbicida sulfentrazone.

Belo et al., (2011) em estudos realizados encontrou que *C. ensiformis* e *D. lablab* são espécies de adubos verdes capazes de realizar um tratamento prévio do solo contaminado por sulfentrazone, propiciando condições favoráveis para o desenvolvimento da cultura do sorgo.

Tabela 18 - Acúmulo de massa seca da parte aérea do sorgo cultivada em solo tratado com doses crescentes do herbicida sulfentrazone.

TRATAMENTOS (l.ha^{-1})	MSPAS, (g)	MSPAS, (g)	MSPAS, (g)
	Adubo Verde	Comunidade Nativa	Comunidade Capinada
0	3,53 Ba	3,49 BCa	3,25 Ba
1	3,71 Bab	4,05 Cb	2,30 Ba
2	2,19 ABa	1,91 ABa	3,19 Ba
4	0,84 Aa	0,60 Aa	0,07 Aa

MSPAS: Massa Fresca da parte aérea das fitorremediadoras. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

5 CONCLUSÃO

A *Crotalaria juncea* foi a espécie mais tolerante ao solo contaminado por sulfentrazone, com possível efeito fitorremediador.

A comunidade de adubos verdes e a comunidade de plantas nativas proporcionaram melhores condições para o cultivo de sorgo cultivado em sucessão em solo contaminado por sulfentrazone.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V.; V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1. p. 299-352.
- ALVES, V. M. C.; VASCONCELLOS, C. A.; FREIRE, F. M.; PITTA, G. V. E.; FRANÇA, G. E. de. Sugestões de adubação para as diferentes culturas em Minas Gerais. In: RIBEIRO, A.C., GUIMARÃES, P.T.G., ALVAREZ V., V.H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5. Aproximação. Viçosa: CFSEMG, 1999. p.325-327.
- AMABILE, R.F.; FANCELLI, A.L.; CARVALHO, A.M. Comportamento de espécies de adubos verdes em diferentes épocas de semeadura e espaçamentos na região dos cerrados.
- ARTUZI, J. P.; CONTIERO, R. L. Herbicidas aplicados na soja e produtividade do milho em sucessão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 7, p. 1119-1123, 2006.
- ASSIS, R.L. de; PROCÓPIO, S. de O.; CARMO, M. L. do; PIRES, F. R.; FILHO, A. C.; BRAZ, G. B. P. Fitorremediação de solo contaminado com o herbicida picloram por plantas de capim pé de galinha gigante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.11, p.1131–1135, 2010.
- BELO AF, COELHO A TCP, FERREIRA LR, SILVA AA& SANTOS JB (2011) Potencial de espécies vegetais na remediação de solo contaminado com sulfentrazone. **Planta Daninha**, 29:821-828.
- BLANCO, F. M. G.; VELINI, E. D. Persistência do herbicida sulfentrazone em solo cultivado com soja e seu efeito em culturas sucedâneas. **Planta Daninha**, v. 23, n. 4, p. 693-700, 2005.
- CARMO, M. L. et al. Influência do período de cultivo de *Panicum maximum* (cultivar Tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com picloram. **Planta Daninha**, v. 26, n. 2, p. 315-322, 2008.
- CARRETERO, D.M. Efeitos da inibição da protoporfirinogênio IX oxidase sobre as trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em plantas de soja (*Glycine max* L. Merrill). 2008. 57f. **Dissertação** (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- CUNNINGHAM, S. D. E. A. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. [S.l.]: **Adv. Agron**, v. 56, 1996. p. 55-114.
- FAHL, J.I.; CAMAERGO, M. B. P. De; PIZZINATTO, M. A.; BETTI, J. A.; MELO, A. M. T. de; De Maria, I. C.; FURLANI, A. M. C. et al. (Eds.) **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. Campinas, Instituto Agrônomo, 6.ed. rev. atual. 1998. 396p. (Boletim 200)

FAVERO, C.; JUCKSCH, I.; ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M. Modificações na população de plantas espontâneas na presença de adubos verdes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, p.1355-1362, 2001.

FERREIRA, D. F. **Programa SISVAR**: Sistema de Análise de Variância. Versão 4.6 (Build 6.0). Lavras: DEX/UFLA. 2003.

Gan, S. Senescence processes in plants. **Blackwell Publishing Ltd**, Iowa, USA, 2007. p.322.

GERHARDT, K. E.; HUANG, X.; GLICK, B. R.; GREENBERG, B. M. Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: Potential and Challenges. **Plant Science**. v.176, p.20-30, 2009.

LASAT, M. M.; KOCHIAN, L. V. *Physiology of Zn hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens**. In: TERRY, N.; BAÑUELOS, G. (Ed.). *Phytoremediation of contaminated soil and water*. Boca Raton: **Lewis Publishers**, 2000. p.159-169.

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

MADALÃO, J. C. Comunicação susceptibilidade de espécies de plantas com potencial de fitorremediação do herbicida sulfentrazone. 2013. 103 f. **Dissertação** (Mestrado em Produção Vegetal) Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2011.

MADALÃO, J. C. Seleção de espécies para a fitorremediação de solos contaminados com o herbicida sulfentrazone. 2011. 103 f. **Dissertação** (Mestrado em Produção Vegetal) Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2011.

MADALÃO, J.C.; PIRES, F.R.; CHAGAS, K.; CARGNELUTTI FILHO, A.; PROCÓPIO, S.O. Uso de leguminosas na fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, n.4, p.390-396, 2012.

MAIN, C. L. et al. Sulfentrazone persistence in southern soils: bioavailable concentration and effect on a rotational cotton crop. **Weed Technol.**, v. 18, n. 2, p. 346-352, 2004.

MANCUSO, M. A. C.; NEGRISOLI, E.; PERIM, L. **Efeito residual de herbicidas no solo ("Carryover")**. Revista Brasileira de Herbicidas, v.10, n.2, p.151-164, 2011.

MATEUS, G. P., WUTKE, E. B., Espécies de leguminosas utilizadas como adubos verdes. **Pesquisa & Tecnologia**, vol. 3, n.1 Jan-Jun 2006.

MELO, C. A. D.; MEDEIROS, W. N.; TUFFI SANTOS, L. D.; FERREIRA, F. A.; FERREIRA, G. L.; PAES, F. A. S. V.; REIS, M. R. Efeito residual de sulfentrazone, isoxaflutole e oxyfluorfen em três solos. **Planta Daninha**, v. 28, n. 4, p. 835-842, 2010.

OLIVEIRA, N. S. S. D. **Características forrageiras de genótipos de sorgo submetidos a diferentes densidades de plantas e épocas de corte**. Sete Lagoas-MG, 2015.

PEREIRA, F. A. R. et al. Seletividade de sulfentrazone em cultivares de soja e efeitos residuais sobre culturas sucessivas em solos de cerrado. *R. Bras. Herbicida*, v. 1, n. 3, p. 219-224, 2000.

PIRES, F. R. E. A. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. *Planta daninha*, Viçosa, v. XXI, n. 2, p. 335-341, Maio 2003. ISSN 0100-8358/1806-9681.

PIRES, F. R. et al. Fitorremediação de solos contaminados com tebuthiuron utilizando-se espécies cultivadas para adubação verde. *Planta Daninha*, v. 23, n. 4, p. 711-717, 2005a.

PIRES, F. R. et al. Inferências sobre atividade rizosférica de espécies com potencial para fitorremediação do herbicida tebuthiuron. *R. Bras. Ciências do Solo*, v. 29, n. 4, p. 627-634, 2005b.

PROCÓPIO, S. O. E. A. Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de solos contaminados com o herbicida trifloxysulfuron sodium. *Planta Daninha*, Viçosa-MG, v. XXII, p. 315-322, 2004.

REIS, M.R.; SILVA, A.A.; COSTA, M.D.; GUIMARÃES, A.A.; FERREIRA, E.A.; SANTOS, J.B. et al. Atividade microbiana em solo cultivado com cana-de-açúcar após aplicação de herbicidas. *Planta Daninha*, v.26, n.2, p.323331, 2008.

RIBEIRO, A. C. G. P. T. G. V. R. H. **5º Aproximação**. Viçosa - MG: [s.n.], 1999.

ROBINSON, D.E. Atrazine accentuates carryover injury from mesotrione in vegetable crops. *Weed Technology*, v.22, n.4, p.641-645, 2008.

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

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

ROSA W. J. Cultura do Sorgo. **Departamento Técnico da Emater–MG**, 2012

SANTOS, E. A. et al. Fitoestimulação por *Stizolobium aterrimum* como processo de remediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium. *Planta Daninha*, v. 25, n. 2, p. 259-265, 2007.

SILVA, M. I. L.; CAVALCANTI, M. A. Q. Fungos na rizosfera de sementes de tomate (*Lycopersicon esculentum*). *Fitopatologia*. Bras, v. 15, n. 4, p. 323-326, 1990.

SILVA, A.A.; SILVA, J.F. Competição entre plantas daninhas e culturas. In: Silva, A.A.; Silva, J.F. (Eds.). **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.17-61.

SOUZA, L. A. **Caracterização de respostas fisiológicas e bioquímicas de *Dolichos lablab* ao cádmio**. Campinas-SP. 2014.

SCHEIL, V.; KIENLE, C.; OSTERAUER, R.; KOHLER, H. Effects of 3,4-dichloroaniline and diazinon on different biological organisation levels of zebrafish (*Danio rerio*) embryos and larvae. **Ecotoxicology**, v.18, n.3, p.355-363, 2009.

SCHNOOR, J. L. Phytoremediation of soil and ground water. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, **Technology Evaluation Report** TE-0201. 2002.

TRIPATHY, B.C.; Mohapatra, A.; Gupta, I. Impairment of the photosynthetic apparatus by oxidase stress induced by photosensitization reaction of protoporphyrin IX. **Biochimica et Biophysica Acta**, v.1767, n.6, p.860-868, 2007.

VOSE, J. M. et al. Leaf water relations and sapflow in Eastern cottonwood (*Populus deltoides* Bartr.) trees planted for phytoremediation of a groundwater pollutant. **International Journal of Phytoremediation**, v. 2, p. 53-73, 2000.

VIVIAN, R. et al. Persistência de sulfentrazone em Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 24, n. 4, p. 741-750, 2006.

WEBER, J. B. Mechanism of adsorption of s-triazines by clay colloids and factors affecting plant availability. **Residue Rev.**, v. 32, p. 93-130, 1970.

WUTKE, E.B. Adubação verde: manejo da fitomassa e espécies utilizadas no Estado de São Paulo. In: WUTKE, E.B.; BULISANI, E.A.; MASCARENHAS, H.A.A. (Coords.) CURSO SOBRE ADUBAÇÃO VERDE NO INSTITUTO AGRONÔMICO, 1. 1993, Campinas: **Instituto Agrônomo**,1993. p.17-29. (Documentos IAC, 35).