

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM AGRONOMIA**

JUCELIA MARIA PEREIRA

**FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM SULFENTRAZONE
EM FUNÇÃO DA INOCULAÇÃO DE BACTÉRIAS SIMBIÓTICAS EM
ESPÉCIES LEGUMINOSAS**

SÃO JOÃO EVANGELISTA

2023

JUCELIA MARIA PEREIRA

**FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM SULFENTRAZONE EM
FUNÇÃO DA INOCULAÇÃO DE BACTÉRIAS SIMBIÓTICAS EM ESPÉCIES
LEGUMINOSAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Agronomia, no Instituto Federal de Minas Gerais campus São João Evangelista (IFMG/SJE).

Orientador: Prof. Me. Alisson José Eufrásio de Carvalho.

SÃO JOÃO EVANGELISTA

2023

P436f

Pereira, Jucelia Maria.

Fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone em função da inoculação de bactérias simbióticas em espécies leguminosas.

[manuscrito] / Jucelia Maria Pereira. – São João Evangelista: Instituto Federal de Minas Gerais, 2023.

41 f.; il., color.

Orientador: Prof. Me. Alisson José Eufrásio de Carvalho.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista, Bacharelado em Agronomia.

1. Solos - descontaminação. 2. Solos – resíduos herbicidas. 3. Simbiose
4. Herbicidas. 5. Fitorremediação I. Carvalho, Alisson José Eufrásio. II.
Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista. III.
Título

CDD 631.8

Catálogo: Luciana Batista Neves - CRB-6/2000

JUCELIA MARIA PEREIRA

**FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM SULFENTRAZONE EM
FUNÇÃO DA INOCULAÇÃO DE BACTÉRIAS SIMBIÓTICAS EM ESPÉCIES
LEGUMINOSAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Agronomia no Instituto Federal de Minas Gerais campus São João Evangelista (IFMG/SJE).

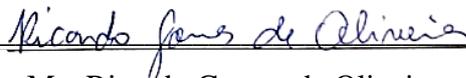
Aprovado em: 03 / 03 / 2023 pela banca examinadora:



Orientador Prof. Me. Alisson José Eufrásio de Carvalho
Instituto Federal de Minas Gerais - IFMG



Prof. Dr. Rafael Carlos dos Santos
Instituto Federal de Minas Gerais - IFMG



Me. Ricardo Gomes de Oliveira
Instituto Federal de Minas Gerais - IFMG

Aos meus pais, Maria Júlia e Francisco.

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente, quem sempre me guiou e deu forças para chegar até aqui, me sustentando nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Maria Júlia e Francisco, por acreditarem que eu conseguiria quando eu mesma descreditei, e por terem feito deste, o sonho deles também.

Aos meus irmãos, Francis, Juliana, Edelson, Samuel e Danilo, por todo apoio, e por nunca medirem esforços para me ajudar no que fosse preciso.

A minha avó Maria Ferreira e minha tia Elza, por toda ajuda prestada durante esses anos.

A Laís, Tainara e Danielle, amigas de longa data, que mesmo com a distância, sempre se fizeram presentes.

Ao IFMG *Campus* São João Evangelista, pela oportunidade de formação em uma instituição de ensino tão renomada e com excelentes profissionais.

Ao professor e orientador Me. Alisson Jos é Eufrásio de Carvalho, por toda paciência dedicada ao longo dos anos, afim de passar todo o conhecimento possível. Por seu companheirismo, amizade, pelos conselhos, e por toda ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

A Amanda, Analice, Ana Lívía, Elias, Igor, Jackson, James, Josiel, Matheus, Paula e Thalita, por toda ajuda prestada na implantação e condução do experimento.

Aos amigos que se tornaram família ao longo dos anos, com os quais compartilhei vários momentos, alegres e tristes. Sem vocês, tudo seria mais difícil, obrigada Agatha, Amanda, Analice, Ana Lívía, Clinton, Jackson, Mariana e Yuri por todo o companheirismo.

RESUMO

Os herbicidas podem impactar o setor agrícola e ambiental de forma positiva e negativa. Os herbicidas pré-emergentes possuem a capacidade de se manterem no solo por mais tempo após a aplicação, afim de controlar a emergência de plantas daninhas durante todo o ciclo da cultura, porém em alguns casos, este residual que permanece no solo pode causar efeito tóxico a culturas de sucessão sensíveis a eles (*carryover*). Algumas espécies de planta são tolerantes a certos herbicidas e possuem o poder de descontaminar solos que apresentem resíduos dos mesmos. Essas são chamadas de fitorremediadoras e as principais são as leguminosas, que em associação com bactérias fixadoras de nitrogênio do gênero *Bradyrhizobium*, geram diversos benefícios ao solo, além da fitorremediação do herbicida. No presente trabalho foram utilizadas diferentes combinação das espécies de *Canavalia ensiformes*, *Crotalária spectabilis*, e *Mucuna pruriens*, inoculadas *Bradyrhizobium elkanii*, da cepa BR 2003, para avaliar sua capacidade em fitorremediar o sulfentrazone, que é um herbicida pré-emergente utilizado em grandes culturas e com alta persistência no solo, na dosagem de 1,2 L ha⁻¹. O experimento foi realizado em delineamento em blocos casualizados, em fatorial 4 x 8, em que o fator 1 refere-se aos níveis de substrato com e sem a presença do sulfentrazone e do inoculante, e o fator 2 refere-se às 8 combinações das espécies leguminosas. As espécies foram avaliadas isoladamente e em consórcio. Quanto ao cultivo isolado, a crotalária obteve menores índices de intoxicação e maior produção de massa seca, apresentando maior potencial de fitorremediação do sulfentrazone entre as espécies em cultivo isolado. Já o consórcio da crotalária com a mucuna apresentou alta produção de massa seca entre as plantas cultivadas em comunidade, além de um baixo nível de toxicidade, mostrando que o consórcio delas também se mostra com grande potencial, sendo viável a implantação das duas espécies. A inoculação das espécies não causou efeito positivo sobre a fitorremediação.

Palavras-chave: Herbicida. Efeito residual. Simbiose.

ABSTRACT

Herbicides can impact the agricultural and environmental sector in both positive and negative ways. Pre-emergent herbicides have the ability to remain in the soil for a longer time after application, in order to control the emergence of weeds throughout the crop cycle, but in some cases, this residual that remains in the soil can cause a toxic effect. to succession cultures sensitive to them (carryover). Some plant species are tolerant to certain herbicides and have the power to decontaminate soils that present their residues. These are called phytoremediators and the main ones are legumes, which, in association with nitrogen-fixing bacteria of the genus *Bradyrhizobium*, generate several benefits to the soil, in addition to the phytoremediation of the herbicide. In the present work, different combinations of species of *Canavalia ensiformes*, *Crotalaria spectabilis*, and *Mucuna pruriens*, inoculated with *Bradyrhizobium elkanii*, strain BR 2003, were used to evaluate its ability to phytoremediate sulfentrazone, which is a pre-emergent herbicide used in large crops and with high persistence in the soil, at a dosage of 1.2 L ha⁻¹. The experiment was carried out in a randomized block design, in a 4 x 8 factorial, in which factor 1 refers to the levels of substrate with and without the presence of sulfentrazone and inoculant, and factor 2 refers to the 8 combinations of leguminous species. The species were evaluated separately and in consortium. As for the isolated cultivation, sunn hemp had lower intoxication rates and higher dry mass production, showing a greater potential for phytoremediation of sulfentrazone among the species in isolated cultivation. The consortium of sunn hemp with mucuna showed high dry mass production among plants cultivated in the community, in addition to a low level of toxicity, showing that their consortium also shows great potential, with the implantation of both species being feasible. Inoculation of the species did not have a positive effect on phytoreme.

Keywords: Herbicide. Residual effect. Symbiosis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Imagem de satélite do local.	19
Figura 2 - Vista aérea da área do experimento.	19
Figura 3 - Croqui da área experimental	20
Figura 4 - Construção dos canteiros.	20
Figura 5 - Construção dos canteiros.	21
Figura 6 - Demarcação das parcelas e subparcelas experimentais.	22
Figura 7 - Inoculante.....	23
Figura 8 - Pesagem do inoculante <i>Bradyrhizobium elkanii</i> , da cepa BR 2003.	23
Figura 9 - Pesagem da solução açucarada.	23
Figura 10 - Solução açucarada misturada às sementes de feijão de porco.	24
Figura 11 - Sementes de feijão de porco espalhadas após inoculação.	24
Figura 12 - Sementes de <i>Crotalaria spectabilis</i> espalhadas após inoculação.	25
Figura 13 - Semeadura.....	25
Figura 14 - Preparo da calda.....	26
Figura 15 - Calda pronta.....	26
Figura 16 - Aplicação do herbicida.	27
Figura 17 - Demarcação de plantas a serem coletadas com gabarito de 0,5 x 0,5m.	28
Figura 18 - Coleta das plantas em bandeja.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características físico-químicas do solo da área experimental (0-20).....	21
Tabela 2 - Escala de avaliação de fitotoxicidade.....	27
Tabela 3 - Resumo da análise de variância (ANOVA) para intoxicação de plantas submetidas a solo contendo resíduos do herbicida sulfentrazone.	30
Tabela 4 - Intoxicação de espécies fitorremediadoras em solo contendo resíduos do herbicida sulfentrazone.....	31
Tabela 5 - Intoxicação da combinação de espécies fitorremediadoras em solo contendo resíduos do herbicida sulfentrazone.....	31
Tabela 6 - Intoxicação de espécies fitorremediadoras em solo contendo resíduos do herbicida sulfentrazone até os 60 dias após o plantio.....	32
Tabela 7 - Toxicidade de plantas fitorremediadoras em função dos níveis de substrato em solo contendo resíduos do herbicida do sulfentrazone.....	33
Tabela 8 - Toxicidade de plantas fitorremediadoras em função dos tempos de avaliação em solo contendo resíduos do herbicida do sulfentrazone.....	33
Tabela 9 - Toxicidade de combinações de espécies fitorremediadoras em função dos tempos de avaliação em solo contendo resíduos do herbicida do sulfentrazone.	34
Tabela 10 - Resumo da análise de variância (ANOVA) para produção de massa seca de plantas submetidas a solo contendo resíduos do herbicida sulfentrazone.	34
Tabela 11 - Produção de massa seca de espécies fitorremediadoras cultivadas em solo com resíduos de herbicida sulfentrazone.....	35
Tabela 12 - Produção de massa seca para as espécies leguminosas submetidas a cultivo em comunidade e isoladas, em solo contendo resíduo de herbicida sulfentrazone.....	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Herbicidas Pré-emergentes	14
2.2 Efeito Residual - <i>Carryover</i>	14
2.3 Sulfentrazone	15
2.4 Fitorremediação	16
2.5 Associação de bactérias do gênero <i>Bradyrhizobium elkanii</i> BR 2003 com leguminosas	18
3 METODOLOGIA	19
3.3 Preparo da Área	20
3.3.1 Divisão das Parcelas	21
3.4 Inoculação	22
3.5 Semeadura	25
3.6 Aplicação do Herbicida	26
3.8 Coleta de dados	27
3.8.1 Avaliações de fitotoxicidade	27
3.8.2 Coleta de plantas	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1 Intoxicação	30
5 CONCLUSÃO	38
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1 INTRODUÇÃO

O uso de defensivos agrícolas é de grande importância para a produção agrícola mundial, e, por isso, amplamente utilizado em inúmeras culturas, favorecendo ganhos em produtividade devido ao controle de plantas daninhas, de insetos praga, dentre outros fatores que poderiam prejudicar essa produção (SANTOS e SOUZA, 2009).

Dentre os defensivos agrícolas, estão os chamados herbicidas, que agem alterando o crescimento e desenvolvimento das plantas daninhas, quando sensíveis a eles (EMBRAPA, 2006). A utilização dos mesmos vem contribuindo de forma muito significativa para o crescimento e desenvolvimento da agricultura no Brasil (MANCUSO, 2011).

Segundo Duque *et al.* (2020), os herbicidas pré-emergentes, ou também chamados de residuais são aplicados em pré-plantio, ou imediatamente após, visando o controle de bancos de sementes de plantas daninhas presentes no solo. Quando se faz uso de herbicidas pré-emergentes, geralmente é desejável a permanência de resíduos, afim de prevenir a emergência de plantas daninhas por um maior período, fazendo com que permaneçam controladas nos períodos em que sua interferência se torna crítica para o desenvolvimento da cultura (PATEL, 2018), contribuindo também, para a diminuição na quantidade necessária de aplicações (PIRES *et al.*, 2003).

No entanto, tais herbicidas com prolongada bioatividade podem causar danos a plantas cultivadas em sucessão à sua aplicação (DAM *et al.*, 2012), e com sua vasta utilização, vem sendo observados problemas de intoxicação em algumas plantas, causada justamente pelos resíduos que ainda permanecem no solo depois de algum tempo. A intoxicação ocorre quando posteriormente a um cultivo onde houve a aplicação de um herbicida com efeito residual, há a implantação de cultura sensível a este composto, isto traz efeitos negativos à produtividade da mesma (MANCUSO, 2011).

Como exemplo de herbicida pré-emergente, ou seja, com efeito residual no solo, temos o sulfentrazone, pertencente ao grupo químico das ariltriazolinas, que é um herbicida utilizado no controle de plantas daninhas em algumas das principais culturas brasileiras (RODRIGUES e ALMEIDA, 2005). Apresenta atividade residual prolongada entre 6 e 24 meses, a variar de acordo com as características do solo e condições ambientais (MARTINEZ *et al.*, 2008; MONQUEIRO *et al.*, 2010).

Com o intuito de solucionar ou mesmo minimizar os problemas causados pela permanência desses compostos no solo, são utilizadas algumas técnicas, sendo a principal delas, a fitorremediação (MALADÃO *et al.*, 2012), que, nada mais é que a utilização de plantas como

agentes de descontaminação. Essa técnica vem como uma alternativa sustentável para a despoluição de solos e água (MALADÃO *et al.*, 2012).

Para a seleção das plantas fitorremediadoras, além do poder de descontaminação, outros aspectos benéficos ao solo também são levados em consideração, sendo muito comum o uso de plantas utilizadas para cobertura de solo e adubos verdes (PIRES *et al.*, 2003). Nesse sentido, as leguminosas são grandes aliadas, pois, além da despoluição, fornecem outros benefícios ao solo, como o incremento de nitrogênio, acúmulo de material orgânico do solo, favorecimento das atividades de microrganismos, dentre outros (EMBRAPA, 2009).

A associação de bactérias simbióticas com essas plantas fitorremediadoras, também traz resultados positivos para ambos os envolvidos, pois, os microrganismos se alimentam de exsudados da planta, que também é favorecida pela comunidade bacteriana através do aumento de absorção de água e nutrientes e crescimento de raízes, além de se manterem protegidas de contaminantes orgânicos (KAWASAKI; WARREN; KERTÉSZ, 2015).

O presente trabalho busca a realização de fitorremediação de área contaminada com resíduos do herbicida pré-emergente sulfentrazone, com o uso de três espécies leguminosas, sendo elas a *Canavalia ensiformis*, a *Crotalaria spectabilis*, e a *Mucuna pruriens*, correlacionando este resultado com a inoculação de bactérias fixadoras de nitrogênio do gênero *Bradyrhizobium* nas sementes das leguminosas anteriormente ao plantio. Tendo como objetivo geral a avaliação da capacidade de fitorremediação de resíduos de sulfentrazone no solo com o uso de espécies leguminosas inoculadas com bactérias fixadoras de nitrogênio, e objetivos específicos a avaliação de combinações de espécies leguminosas para a fitorremediação de resíduos de sulfentrazone, e do efeito da inoculação com bactérias fixadoras de nitrogênio em espécies leguminosas na fitorremediação de resíduos de sulfentrazone.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Herbicidas Pré-emergentes

São classificados como herbicidas pré-emergentes, aqueles que tem sua aplicação realizada logo após a semeadura da cultura de interesse, mas anteriormente à emergência da mesma, assim como das plantas daninhas. A eficiência desses produtos nesse tipo de aplicação dependerá da disponibilidade de água do solo, uma vez que depende de processos como crescimento radicular e emergência de sementes para poder iniciar sua ação (OLIVEIRA JR.; CONSTANTIN; INOUE, 2011).

Os herbicidas pre-emergentes têm atuação direta no banco de sementes do solo, prejudicando a emergência das plantas daninhas, e quando ainda assim, ocorre a germinação, ela é mais uniforme, o que facilita no momento de realizar o controle em pós-emergência, possibilitando maior assertividade no controle (SANTOS, 2022).

O período anterior a interferência das plantas daninhas (PAI) se refere ao tempo após semeadura ou plantio em que a cultura consegue conviver com a planta daninha sem que sofra danos e perda de produtividade (CARVALHO, 2021). Sendo assim, no manejo das plantas daninhas o PAI é considerado o período mais importante e que precisa de maior atenção, pois, a partir dele, a produtividade é significativamente afetada. Contudo, o uso de herbicidas pré-emergentes, possibilita o aumento desse período, pois, como as plantas daninhas permanecem controladas no início do desenvolvimento da cultura, cresce a vantagem competitiva das mesmas (MESCHED, 2004).

2.2 Efeito Residual - *Carryover*

O efeito residual é a característica que um herbicida possui de manter íntegra sua molécula, preservando seus aspectos biológicos, físicos e químicos. (OLIVEIRA JR.; CONSTANTIN; INOUE, 2001).

São considerados resíduos de herbicida aqueles que permanecem no solo por mais tempo após a aplicação, o que é desejável se considerarmos o controle de plantas daninhas durante o ciclo da cultura, porém, se permanecem após este período pode prejudicar o crescimento e desenvolvimento de culturas de sucessão (CURRAN, 2001).

Quando o efeito residual de herbicida no solo afeta negativamente culturas agrícolas, reduzindo sua produtividade e qualidade, gera o fenômeno conhecido como carryover (MANCUSO *et al.*, 2011). É válido ressaltar que, a permanência do herbicida no solo é diferente, e sempre maior que o carryover. Podendo desta forma, haver resíduos do herbicida

em determinada área, mas estes não estarem disponíveis e assim, não causarem efeito tóxico às plantas. Somente a partir do momento que este efeito é detectado, é que temos a presença do carryover (MENDES; DIAS; REIS).

O potencial do efeito residual, assim como seu poder de causar intoxicação em culturas de sucessão dependerá do herbicida aplicado, do grau de sensibilidade desta cultura, e também das condições ambientais após a aplicação. Para evitar intoxicação, é necessário um bom planejamento, afim de se evitar sucessão com cultura sensível a herbicidas utilizados anteriormente, quando estes possuírem efeito residual prolongado, ou o ideal, que é o controle dos resíduos até o final do ciclo da cultura (MANCUSO *et al.*, 2011).

2.3 Sulfentrazone

O sulfentrazone (N-[2,4-dicloro-5-[4-(difluorometil)-4,5 dihidro-3-metil-5-oxo-1H-1,2,4-triazol-1-il]metanosulfonamida), é um herbicida pré-emergente, pertencente ao grupo químico das ariltriazolinas (MARTINEZ *et al.*, 2008; MONQUEIRO *et al.*, 2010). É utilizado para controle de diversas espécies de plantas daninhas, tanto dicotiledôneas, quanto monocotiledôneas, com registro para as culturas da soja, cana-de-açúcar, café, eucalipto e fumo (MONQUEIRO *et al.*, 2010).

O mecanismo de ação do sulfentrazone inibe a ação da protoporfirinogênio oxidase, ou PROTOX (Grupo E, de acordo com o sistema de classificação do HRAC-BR – Comitê de Ação a Resistência aos herbicidas), uma enzima presente nos cloroplastos das plantas, bloqueando a síntese de clorofila (SIMPLÍCIO *et al.*, 2018).

Esse grupo também é conhecido como inibidores da síntese de tetrapirrole, ou inibidores da síntese de protoporfirina IX. A partir da ação do herbicida de inibir a PROTOX, a protoporfirinogênio sai do seu centro de reação, se acumulando no citoplasma da célula, onde ocorre uma oxidação não enzimática, que resulta em uma protoporfirina IX de conformação estrutural diferente daquela produzida pela via normal, esta, não teria capacidade de transformar-se em Mg-protoporfirina IX, por esse motivo, não há a produção da clorofila. A protoporfirina IX produzida, em reação com a luz e oxigênio, leva o oxigênio ao estado singlet, uma forma mais reativa e com mais energia, que causa a peroxidação dos lipídeos da membrana celular. Com a oxidação de proteínas e lipídeos, ocorre perda de carotenoides e clorofila, além de causar o rompimento das membranas, e conseqüentemente a desidratação e desintegração das organelas (OLIVEIRA JR; CONSTANTIN; INOUE, 2011; EMBRAPA, 2008).

É um composto resistente à lixiviação, e bastante sorvido pela matéria orgânica, fazendo com que atue bem superficialmente no solo no momento da emergência das plântulas, causando

a rápida necrose e morte das mesmas assim que entram em contato com a camada de solo tratada (OLIVEIRA JR; CONSTANTIN; INOUE, 2011). O sintoma característico da intoxicação por este herbicida é necrose do tecido foliar (causada pela peroxidação de lipídeos), que, entra em contato com o herbicida no momento da emergência da plântula, mesmo plantas tolerantes podem apresentar pequenas injúrias. (SIMPLÍCIO *et al.*, 2018). Os sintomas são apresentados rapidamente nas plantas sensíveis, que, quando tratadas pelo herbicida e expostas à luz, necrosam e podem chegar à morte entre 1 a 2 dias (DIAS, 2015).

Com efeito residual no solo de 12 a 24 meses, podendo variar de acordo com as condições de solo e do ambiente (MARTINEZ *et al.*, 2008; MONQUEIRO *et al.*, 2010), o sulfentrazone é considerado um herbicida com elevada permanência nos solos brasileiros, tendo meia vida variando de 110 a 280 dias. A meia vida refere-se ao período necessário para que metade da dose aplicada inicialmente seja dissipada (MANCUSO *et al.*, 2011).

A atividade microbiológica é considerada como o mecanismo inicial e muito importante na degradação do sulfentrazone, uma vez que, em solos autoclavados, ou seja, livres da presença de microrganismos, o processo de degradação da molécula é muito lento (BRUM; FRANCO; JÚNIOR, 2013).

2.4 Fitorremediação

Com a capacidade de despoluição de solos e de água, a fitorremediação se mostra uma técnica bastante eficaz, promovendo a degradação de compostos orgânicos e inorgânicos em áreas contaminadas (MALADÃO *et al.*, 2012).

A técnica se baseia na tolerância que algumas plantas possuem a determinados compostos, que pode ser o resultado de algum processo como a translocação diferencial, isto é, maior ou menor, de compostos para outros tecidos da planta, seguida de volatilização; e a degradação completa ou parcial. De forma geral, a degradação do poluente acontece na região da rizosfera, ao extrair o contaminante do solo, essa planta tolerante pode armazená-lo para posterior uso, ou mesmo metabolizá-lo em algum produto de menor toxicidade (PIRES *et al.*, 2013).

Além da comprovada eficácia, a fitorremediação se torna bastante viável, pois, consiste numa técnica de baixo custo, quando comparada com tratamentos químicos; que oferece menor impacto ambiental, utilizando do mecanismo da própria planta; pode ser utilizada para tratar áreas contaminadas com diferentes tipos de contaminantes; e ainda oferece a possibilidade de uso do solo para plantio após o tratamento (COSTA, 2019).

Dentro da fitorremediação, existem ainda vários mecanismos distintos com o mesmo propósito de realizar a descontaminação tanto de solo quanto de água, porém de diferentes maneiras, entre eles, está a rizorremediação, que acontece quando a degradação da molécula contaminante é realizada por microrganismos associados à rizosfera da planta (COSTA, 2019).

Para a busca da melhor espécie a ser utilizada na fitorremediação, é necessário inicialmente saber sobre a seletividade dessas plantas à molécula que se deseja trabalhar. Com relação à contaminação por resíduos de herbicida, vários trabalhos têm sido desenvolvidos afim de determinar essas espécies (MALADÃO, 2013).

MALADÃO, (2013), ainda concluiu em suas pesquisas que, o *Dolichos lablab*, *Canavalia ensiformis*, e a *Crotalaria juncea* têm potencial para serem avaliadas quanto à capacidade de fitorremediar o sulfentrazone, principalmente em solos contaminados com até 400 g.ha⁻¹. Ainda com relação ao sulfentrazone, Belo *et al.* (2011) trazem as espécies *Helianthus annuus*, *Arachis hypogaea*, e novamente a *Canavalia ensiformis* e *Dolichos lab lab* como indicadas para a fitorremediação, além de CARVALHO *et al.* (2018), que apresentam a *Crotalaria spectabilis*, *Mucuna pruriens* e a *Avena strigosa* como plantas com potencial para a descontaminação de solos contaminados com sulfentrazone.

Tem-se observado a grande eficácia das leguminosas na fitorremediação de herbicidas, e elas, além de promoverem a despoluição desse solo, trazem vários outros benefícios ao mesmo, e ao ambiente, o que é o ideal, segundo Pires *et al.* (2003).

Dentre melhorias geradas por essas plantas, podemos descrever a contribuição para o aspecto químico do solo, em que, é grande o incremento de nitrogênio a partir da capacidade dessas espécies de fixarem esse nutriente da atmosfera associadas com bactérias fixadoras dos gêneros *Rhizobium* e *Bradyrhizobium*, podendo até mesmo substituir a adubação mineral em alguns casos quando usadas como adubo verde (EMBRAPA, 2009). Além do incremento de nitrogênio, Santos *et al.* (2019), ressaltam ainda as leguminosas *Canavalia ensiformis*, *Cajanus cajan* e *Crotalaria juncea* como influências positivas no teor de fósforo residual no solo após suas decomposições.

As leguminosas possibilitam ainda um acúmulo de biomassa na superfície do solo, contribuindo para aumento do teor de matéria orgânica com o passar do tempo. Isto é, esta biomassa formada por folhas, galhos e estruturas reprodutivas, constituem a camada de serapilheira, que, sofre a ação da decomposição, A ação do processo de decomposição sobre a serapilheira proporciona a ciclagem de nutrientes, que possui importante papel na recuperação de áreas degradadas (NOGUEIRA, 2012). O material orgânico fornecido contribuirá para a

atividade de microrganismos no solo, servindo como fonte de nutrição e energia para eles, e, quanto mais intensa for essa atividade, mais ciclagem de nutrientes ocorre, fazendo com que haja um melhor aproveitamento dos fertilizantes aplicados. O uso de leguminosas também interfere de forma muito positiva na física do solo, promovendo a descompactação, maiores taxas de infiltração e retenção de água, maior densidade, porosidade, e estabilidade de agregados (EMBRAPA, 2009).

2.5 Associação de bactérias do gênero *Bradyrhizobium elkanii* BR 2003 com leguminosas

Como mencionado em tópicos anteriores, a associação de plantas com bactérias tende a ser benéfica para ambas as partes, em especial pela realização da fixação biológica de nitrogênio (FBN) através da produção de nódulos, contribuindo para o crescimento da planta (COSTA, 2019), além disso, a atividade microbiológica na rizosfera das espécies vegetais, promoverá a rizodegradação/rizoremediação, ou seja, contribuirá para a degradação de moléculas poluidoras, como resíduos de herbicidas (OHMES *et al.*, 2000).

O gênero *Bradyrhizobium elkanii* é um grupo de bactérias fixadoras de nitrogênio, que, com frequência estão presentes em nódulos de leguminosas, e são linhagens bem adaptadas a diferentes regiões e biomas (ZILLI *et al.*, 2020).

Ainda Segundo Zilli *et al.* (2020), trabalhos indicaram que a cepa BR 2003, se mostrou eficiente na fixação biológica de nitrogênio nas espécies de *C. juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformis*, e *Indigofera hirsuta*. Tornando-se relevante o uso da inoculação desses organismos nas sementes antes do plantio, afim de garantir a colonização das mesmas na rizosfera da planta.

3 METODOLOGIA

O trabalho foi conduzido no setor de olericultura do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, *campus* São João Evangelista – IFMG-SJE. O município de São João Evangelista, apresenta temperatura média anual de 20,1°C, precipitação pluviométrica média de 1.180 mm, e a altitude média de 692 m (SILVA, 2013). O experimento foi desenvolvido entre os meses de novembro de 2022 a janeiro de 2023.

Figura 2 - Imagem de satélite do local.



Fonte: Google Earth.

Figura 1 - Vista aérea da área do experimento.



Fonte: Próprio autor, 2023.

3.2 Delineamento Experimental

O experimento foi instalado em delineamento em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 4 x 8, sendo o fator 1, os níveis de substrato e o fator 2, as combinações de plantas. Foi utilizado o arranjo com parcelas subdividas, sendo as parcelas os herbicidas e as subparcelas as combinações das espécies leguminosas. Foram utilizadas quatro repetições, totalizando 128 unidades experimentais.

Os níveis de substratos do fator 1 foram: nível 1 - sulfentrazone com inoculação das sementes; nível 2 - sulfentrazone sem inoculação das sementes; nível 3 - ausência de herbicida com inoculação das sementes; nível 4 - ausência de herbicida inoculação das sementes. Para o fator 2, as combinações foram: combinação 1 - feijão de porco + crotalária + mucuna (FP+CR+MU); combinação 2 - feijão de porco + crotalária (FP+CR); combinação 3 - feijão de porco + mucuna (FP+MU); combinação 4 - crotalária + mucuna (CR+MU); combinação 5 - ausência de plantas (AP); combinação 6 - feijão de porco (FP); combinação 7 - mucuna (MU); combinação 8 - crotalária (CR).

Figura 3 - Croqui da área experimental

		Sulfentrazone									Sem herbicida							
Bloco 1	Inoculadas	2	1	3	4	5	6	8	7		2	4	1	3	5	7	6	8
	Não inoculadas	2	1	3	4	5	6	8	7		2	4	1	3	5	7	6	8
		Sem Herbicida									Sulfentrazone							
Bloco 2	Inoculadas	1	3	2	4	5	6	8	7		3	2	4	1	5	6	7	8
	Não inoculadas	1	3	2	4	5	6	8	7		3	2	4	1	5	6	7	8
		Sulfentrazone									Sem herbicida							
Bloco 3	Inoculadas	5	1	4	2	3	8	7	6		1	4	2	3	5	6	8	7
	Não Inoculadas	5	1	4	2	3	8	7	6		1	4	2	3	5	6	8	7
		Sem Herbicida									Sulfentrazone							
Bloco 4	Inoculadas	3	5	2	1	4	7	8	6		4	1	2	3	5	8	6	7
	Não inoculadas	3	5	2	1	4	7	8	6		4	1	2	3	5	8	6	7

Dimensões de cada parcela: 1,70 x 13,2 m (22,44m²);
 Dimensões das subparcelas: 1,70 x 1,65 m (2,8 m²);
 Espaçamento entre parcelas: 0,4 m.

Fonte: Próprio autor, 2023.

3.3 Preparo da Área

Para o preparo da área utilizada primeiro fez-se uma roçada, seguida de aração e gradagem. Em seguida, com o auxílio do encanteirador, foram construídos 8 canteiros com 1,70 x 26,8 m, e espaçamento entre eles de 0,4 m (Figuras 4 e 5). A análise do solo encontra-se na tabela 1.

Figura 4 - Construção dos canteiros.

Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 5 - Construção dos canteiros.

Fonte: Próprio autor, 2022.

Tabela 1. Características físico-químicas do solo da área experimental (0-20)

Textura	Análise granulométrica (%)			pH ¹	M.O ²	CTC (T) ³	V ⁴
	Argila	Silte	Areia	H ₂ O	dag.Kg ⁻¹	cmol _c .dm ⁻³	%
Área	53,7	19,8	26,5	6,15	2,78	7,54	66,3

1. pH em água 2. Matéria Orgânica 3. Capacidade de troca catiônica pH 7,0 4. Índice de saturação de bases

Fonte: Próprio autor, 2022.

3.3.1 Divisão das Parcelas

As parcelas experimentais foram demarcadas com uma área de 1,70 x 13,2 m (22,44 m²). No total, foram demarcadas 2 parcelas em cada canteiro, deixando um espaçamento de 0,4 m, para fazer a separação entre elas. A cada dois canteiros foi representado um bloco, sendo que, em um deles as sementes foram inoculadas com a estirpe BR 2003, e o outro sem inoculação.

Na parcela experimental foram demarcadas 8 subparcelas (referentes às 8 combinações de planta), e para cada uma, foi destinada uma área de 1,70 x 1,65 m (2,8 m²).

Figura 6 - Demarcação das parcelas e subparcelas experimentais.



Fonte: Próprio autor, 2022.

3.4 Inoculação

O inoculante utilizado foi de *Bradyrhizobium elkanii*, da cepa BR 2003 (SEMIA 6156) – adquirido da coleção de culturas da Embrapa Agrobiologia (Figura 7).

A inoculação ocorreu no mesmo dia da semeadura, segundo metodologia da EMPRAPA, que recomenda 50 g do inoculante para 10 kg sementes de mucuna, 50 g para 2 kg sementes de crotalária, e 50 g para 10 kg sementes de feijão de porco (Figura 8). Cada espécie foi inoculada separadamente.

Foi preparada uma solução açucarada a 10% (Figura 9), a qual foi utilizada para umedecer as sementes (Figura 10), de forma bem homogênea, logo em seguida, foi aplicada a dose indicada do inoculante, misturando bem, de forma que todas as sementes ficassem envoltas pelo produto. Depois de misturar bem, as sementes foram espalhadas sobre folhas de papel limpas para que pudessem secar (Figuras 11 e 12). Depois de secas, foram colocadas em sacos plásticos. A semeadura ocorreu cerca de 3 horas depois da inoculação.

Figura 7 - Inoculante.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 8 - Pesagem do inoculante *Bradyrhizobium elkanii*, da cepa BR 2003.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 9 - Pesagem da solução açucarada.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 10 - Solução açucarada misturada às sementes de feijão de porco.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 11 - Sementes de feijão de porco espalhadas após inoculação.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 12 - Sementes de *Crotalaria spectabilis* espalhadas após inoculação.



Fonte: Próprio autor, 2022.

3.5 Semeadura

As sementes das espécies leguminosas: crotalária (*Crotalaria spectabilis*), feijão de porco (*Canavalia ensiformis*) e mucuna-preta (*Mucuna pruriens*) foram adquiridas em casas especializadas. A semeadura foi feita à lanço no dia 04/11/2022, e seguiu a densidade recomendada pela EMBRAPA, de 100 kg.ha⁻¹ de sementes de mucuna, 12 kg.ha⁻¹ de sementes de crotalária, e 100 kg.ha⁻¹ sementes de feijão de porco.

Figura 13 - Semeadura.



Fonte: Próprio autor, 2022.

3.6 Aplicação do Herbicida

Foi aplicado o herbicida de nome comercial Boral 500 SC, que tem como princípio ativo a sulfentrazone, na dosagem de $1,2 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$.

A calda foi preparada no dia 04/11/2022 (Figuras 14 e 15), e a aplicação realizada no dia seguinte com auxílio de um pulverizador costal elétrico provido de barra de pulverização contendo um bico tipo leque Teejet 110.02 e com volume de aplicação de $250 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Figura 16).

Figura 14 - Preparo da calda.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 15 - Calda pronta.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 16 - Aplicação do herbicida.

Fonte: Próprio autor, 2022.

3.8 Coleta de dados

3.8.1 Avaliações de fitotoxicidade

A toxicidade do herbicida nas espécies fitorremediadoras foi avaliada aos 15, 30, 45 e 60 DAS, atribuindo notas de 0 a 100, em que 0 representa ausência de sintomas e 100 a morte da planta. As avaliações foram feitas de acordo com a escala de Alam, (1974).

Tabela 2 - Escala de avaliação de fitotoxicidade.

%	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 plantas

Fonte: ALAM, 1974.

3.8.2 Coleta de plantas

Aos 60 DAS, após a realização da última avaliação, as plantas foram coletadas com o auxílio de um gabarito de 0,5 x 0,5 m. Assim, eram coletadas em cada unidade experimental, as plantas que estivessem dentro da área demarcada por ele (Figura 18). As plantas coletadas foram cortadas e levadas para estufa à temperatura de 65°C, até atingirem peso constante, para posterior determinação de massa seca.

Os resultados seguiram normalidade e homogeneidade de variâncias e não necessitaram de transformação segundo Banzatto e Kronka (2006). Foi realizada a análise de variância, e as médias, quando significativas, agrupadas segundo o teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro.

Figura 17 - Demarcação de plantas a serem coletadas com gabarito de 0,5 x 0,5m.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 18 - Coleta das plantas em bandeja.



Fonte: Próprio autor, 2023.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Intoxicação

A intoxicação das plantas foi altamente significativa ($p > 0,01$) para os níveis de substrato, nas combinações de planta, e no tempo; assim como nas interações de níveis e combinações, níveis e tempo, e combinações e tempo (Tabela 3).

Tabela 3 - Resumo da análise de variância (ANOVA) para intoxicação de plantas submetidas a solo contendo resíduos do herbicida sulfentrazone.

FV	GL	QM
Bloco	3	299,61**
Níveis de substrato	3	3036,47**
Combinações	7	420,60**
Tempo	3	159,12**
Níveis de substrato x Combinações	21	148,37**
Níveis de substrato x Tempo	9	56,68**
Combinações x Tempo	21	23,99**
Níveis de substrato x Combinações x Tempo	63	9,07 ^{ns}
Total	130	511,00
CV%		75,79

CV: coeficiente de Variação; ns: não significativo; **: significativo a 1%.

Fonte: Próprio autor, 2023.

As plantas submetidas aos substratos 1 e 2, com a presença do herbicida apresentaram maiores médias de intoxicação que as submetidas aos substratos 3 e 4, essas não mostraram nenhum sinal de intoxicação, afinal, não estavam na presença da molécula contaminante (Tabela 4).

Ao analisarmos as médias de intoxicação entre as combinações de planta (Tabela 5), primeiramente observamos a combinação 5 sem nenhuma intoxicação, esta, estava sem a presença das leguminosas, logo, a germinação ocorrida fora de plantas daninhas tolerantes ao herbicida, que então não apresentaram sintomas de intoxicação. Como segunda menor média de intoxicação e estatisticamente igual à combinação 5 está a crotalária em cultivo isolado (combinação 8), esta, foi a menos afetada pela presença do herbicida, se mostrando ótima opção como planta fitorremediadoras do sulfentrazone como destacado por BELO *et al.* (2013) e MALADÃO *et al.* (2013).

Tabela 4 - Intoxicação de espécies fitorremediadoras em solo contendo resíduos do herbicida sulfentrazone.

Níveis de substrato	Médias
4	0,00 B
3	0,02 B
2	7,95 A
1	8,88 A

Nível 1: Presença de sulfentrazone com inoculação; nível 2: Presença de sulfentrazone sem inoculação; nível 3: Ausência de herbicida com inoculação; nível 4: Ausência de herbicida sem inoculação.

Fonte: Próprio autor, 2023.

A combinação 7, referente à mucuna foi a que apresentou média de intoxicação mais elevada, apresentando sintomas entre leve a definido de acordo com a escala de avaliação de Alam (1974). Observamos que, mesmo com maiores níveis de intoxicação, quando analisamos a escala de Alam (1974) o nível de toxicidade da mucuna ainda é baixo, permanecendo dentro do aceitável.

Tabela 5 - Intoxicação da combinação de espécies fitorremediadoras em solo contendo resíduos do herbicida sulfentrazone.

Combinações	Médias
5 (AP)	0,02 E
8 (CR)	1,32 E
2 (CR + FP)	3,26 D
3 (FP +MU)	4,38 CD
6 (FP)	5,13 BC
1 (FP + UM + CR)	5,72 BC
4 (CR + UM)	6,17 AB
7 (UM)	7,10 A

Fonte: Próprio autor, 2023.

O feijão de porco e a mucuna em cultivo isolado (combinação 7 e 8) apresentaram intoxicação maior que o cultivo da crotalária (combinação 8), resultado semelhante ao encontrado por MALADÃO *et al.* (2012), que concluíram que o feijão de porco se mostra com potencial para fitorremediação de sulfentrazone, porém, em níveis menores que a crotalária.

Dentre as plantas cultivadas em comunidade, a combinação 4, referente às espécies de mucuna e crotalária foi a que apresentou maior toxicidade. Levando em consideração que quando cultivadas isoladamente, a mucuna apresentou maior grau de intoxicação que a crotalária, provavelmente a mesma seja a responsável por elevar a média de intoxicação da combinação 4.

Já a combinação 2 (feijão de porco e crotalária), entre as comunidades foi a que apresentou menor intoxicação, isso deve-se ao fato de que, quando em cultivo isolado, as duas espécies também apresentaram baixo grau de intoxicação.

Na avaliação das médias de intoxicação com relação ao tempo de cultivo das plantas, notamos que, no decorrer dos dias a intoxicação aumentou, chegando à estabilidade ao final da avaliação (Tabela 6).

Aos 45 dias após a semeadura, as plantas apresentaram o pico na média de intoxicação, chegando quase ao grau 5 da escala de Alam, (1974), que caracteriza sintoma leve. No entanto, as médias das avaliações dos 45 e 60 DAS, ainda foram estatisticamente iguais à média da segunda avaliação realizada aos 30 DAS, sendo, portanto, só a primeira avaliação diferente das demais, com as plantas apresentando menor grau de intoxicação aos 15 DAS, semelhante ao detectado por CARVALHO; GALBIATTI JR.; CAVAZZANA, (2000), que concluíram que nos primeiros dias após semeadura (15 a 25 DAS), o sulfentrazone apresentou baixa intoxicação em plantas de soja.

Tabela 6 - Intoxicação de espécies fitorremediadoras em solo contendo resíduos do herbicida sulfentrazone até os 60 dias após o plantio.

Tempo (DAS)	Médias
15	2,54 B
30	4,65 A
45	4,83 A
60	4,83 A

Fonte: Próprio autor, 2023.

No desdobramento das combinações dentro dos níveis de substrato, todas as combinações nos níveis 3 e 4 foram estatisticamente iguais, não apresentaram intoxicação, uma vez que nesses níveis não haviam a presença do sulfentrazone (Tabela 7). Dentro dos níveis com a presença do herbicida, a combinação de plantas (com exceção da combinação 5 – sem plantas) que apresentou menor toxidez foi a 8, referente à crotalária, mostrando mais uma vez sua capacidade de se desenvolver na presença do herbicida.

A mucuna em cultivo isolado (combinação 7) apresentou maior nível de toxidez nos níveis 1 e 2, sendo que no nível 1, com a inoculação das sementes, a intoxicação foi ainda maior, a crotalária por sua vez, apresentou o menor nível de toxicidade entre as subparcelas cultivadas, sem diferença entre as sementes com e sem inoculação (Tabela 7).

Tabela 7 - Toxicidade de plantas fitorremediadoras em função dos níveis de substrato em solo contendo resíduos do herbicida do sulfentrazone.

Combinações	Níveis de substrato			
	1	2	3	4
1 (CR + FP + UM)	11,52 aB	11,33 aAB	0,06 bA	0,00 bA
2 (FP + CR)	6,99 aC	5,97 Ac	0,06 bA	0,00 bA
3 (FP + MU)	8,77 aBC	8,68 aBC	0,06 bA	0,00 bA
4 (CR + MU)	12,70 aB	12,00 aA	0,00 bA	0,00 bA
5 (AP)	0,10 aD	0,00 aD	0,00 aA	0,00 aA
6 (FP)	10,77 aB	9,77 aAB	0,00 bA	0,00 bA
7 (MU)	17,89 aA	12,91 bA	0,00 cA	0,00 cA
8 (CR)	3,20 aD	2,08 abD	0,00 bA	0,00 bA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula são iguais na mesma linha pelo Teste de Tukey a 5%; médias seguidas pela mesma letra maiúscula são iguais na mesma coluna pelo Teste de Tukey a 5%.

Nível 1: presença de sulfentrazone com inoculação; nível 2: presença de sulfentrazone sem inoculação; nível 4: ausência de herbicida com inoculação; nível 5: ausência de herbicida sem inoculação.

Fonte: Próprio autor, 2023.

A combinação 4, referente ao consorcio de mucuna e crotalária apresentou maior intoxicação entre as plantas cultivadas em comunidade, esta média foi estatisticamente igual nos níveis 1 e 2, com e sem inoculação. As menores médias de toxicidade entre as comunidades foi a da combinação 2, referente ao consórcio de feijão-de-porco com crotalária, nos níveis 1 e 2, estatisticamente iguais (Tabela 7).

Na combinação 4, a mucuna pode ter sido a responsável pela maior média de intoxicação, e não houve diferença entre o nível de substrato inoculado e o nível sem a presença do inoculante, já na combinação 2, a crotalária pode ter contribuído para a baixa toxidez apresentada pela comunidade quando comparada às demais (Tabela 7).

Quando comparamos as médias de intoxicação dos níveis de substratos com relação ao tempo, os níveis 3 e 4 novamente não apresentam nenhum grau de intoxicação em nenhum dos tempos, em decorrência da ausência do herbicida. A intoxicação foi maior aos 45 dias após a semeadura e se manteve com a mesma média aos 60 dias, quando foi realizada a última avaliação, este padrão se manteve nos níveis 1 e 2. Porém, no nível 1, com a inoculação das sementes a intoxicação foi maior. A menor média de intoxicação observada foi na primeira avaliação, aos 15 dias após a semeadura (Tabela 8).

Tabela 8 - Toxicidade de plantas fitorremediadoras em função dos tempos de avaliação em solo contendo resíduos do herbicida do sulfentrazone.

Tempo (DAS)	Níveis de Substrato			
	1	2	3	4
15	5,15 aB	4,94 aB	0,09 bA	0,00 bA
30	9,76 aA	8,84 aA	0,00 bA	0,00 bA
45	10,31 aA	9,02 aA	0,00 bA	0,00 bA

60	10,31 aA	9,02 aA	0,00 bA	0,00 bA
-----------	----------	---------	---------	---------

Médias seguidas pela mesma letra minúscula são iguais na mesma linha pelo Teste de Tukey a 5%; médias seguidas pela mesma letra maiúscula são iguais na mesma coluna pelo Teste de Tukey a 5%.
Nível 1: Presença de sulfentrazone com inoculação; nível 2: Presença de sulfentrazone sem inoculação; nível 3: Ausência de herbicida com inoculação; nível 4: Ausência de herbicida sem inoculação.
Fonte: Próprio autor, 2023.

No desdobramento das combinações dentro do tempo, a combinação 5 não apresentou intoxicação em nenhum dos tempos (Tabela 9). A crotalária isolada (combinação 8), em todas as 4 avaliações apresentou o menor índice de toxidez, evidenciando mais uma vez seu potencial fitorremediador de sulfentrazone. Somente a média da primeira avaliação se difere das demais, apresentando menor toxicidade, e, de acordo com a estatística, todas as médias foram iguais, aos 15, 30, 45 e 60 DAS (Tabela 9).

A intoxicação da mucuna aos 15 DAS, foi menor em relação às demais avaliações, que foram todas estatisticamente iguais aos 30, 45, e 60 DAS. Entre as espécies em comunidade, a combinação 4, novamente foi a que apresentou maior índice de contaminação, sendo menor na primeira, e progressiva nas avaliações seguintes (Tabela 9).

Tabela 9 - Toxicidade de combinações de espécies fitorremediadoras em função dos tempos de avaliação em solo contendo resíduos do herbicida do sulfentrazone.

Combinações	Tempo (DAS)			
	15	30	45	60
1 (FP + CR + UM)	2,52 aABC	6,72 aAB	6,83 aAB	6,83 aAB
2 (FP + CR)	3,14 aABC	3,27 aCDE	3,31 aCDE	3,31 aCDE
3 (FP + MU)	3,27 aABC	4,58 aBCD	4,83 aBCD	4,83 aBCD
4 (CR + UM)	4,37 aA	6,58 aABC	6,87 aAB	6,87 aAB
5 (AP)	0,10 aC	0,00 aE	0,00 aE	0,00 aE
6 (FP)	3,72 aAB	5,39 aBC	5,70 aBC	5,70 aBC
7 (MU)	2,33 bABC	9,18 aA	9,64 aA	9,64 aA
8 (CR)	0,91 aBC	1,45 aDE	1,45 aDE	1,45 aDE

Médias seguidas pela mesma letra minúscula são iguais na mesma linha; médias seguidas pela mesma letra maiúscula são iguais na mesma coluna.
Fonte: Próprio autor, 2023.

4.2 Massa seca

A produção de massa seca apresentou diferença significativa em relação aos níveis de substrato e combinações de plantas ($p > 0,05$) e não significativo para a interação entre os fatores ($p > 0,05$) (Tabela 10).

Tabela 10 - Resumo da análise de variância (ANOVA) para produção de massa seca de plantas submetidas a solo contendo resíduos do herbicida sulfentrazone.

FV	GL	QM
Bloco	3	84400,002**
Níveis de substrato	3	32087,127*
Combinações	7	47507,653**
Níveis x combinações	21	8978,460 ns
Total		127
CV%		43,85

CV: coeficiente de variação; *: significativo a 1%; **: significativo a 5%; ns: não significativo.

Fonte: Próprio autor, 2023.

Com relação a massa seca, a produção foi reduzida em 34% para as plantas submetidas ao substrato 1 em comparação ao substrato 4 (Tabela 11). Sendo assim, a presença da bactéria fixadora de nitrogênio não incrementou o crescimento das plantas. Resultado semelhante foi observado por Arruda; Lopes; Bacarin (2001), que trabalhando com plantas de soja, constataram que a inoculação não causou efeito positivo na presença do sulfentrazone, pelo contrário, o herbicida causou a redução da formação de nódulos, na fixação de nitrogênio e consequentemente de produção de massa seca.

Pode-se observar também que, a produção de massa seca dos níveis 1 e 2 foi menor, comparadas aos níveis 3 e 4, sem aplicação do sulfentrazone, corroborando os resultados de Maladão *et al.* (2012a), que com o aumento da dose de sulfentrazone, até 800g.ha⁻¹, observou diminuição significativa no crescimento e produção de biomassa seca da parte aérea das plantas de crotalária júncea (*C. juncea*), feijão-de-porco (*C. ensiformis*), feijão-guandu (*C. cajan*), e feijão-guandu-anão *C. cajan* (anão).

Tabela 11 - Produção de massa seca de espécies fitorremediadoras cultivadas em solo com resíduos de herbicida sulfentrazone.

Níveis de substrato	Médias
1	146,101 A
2	172,668 AB
3	183,272 AB
4	222,421B

Nível 1: Presença de sulfentrazone com inoculação; nível 2: presença de sulfentrazone sem inoculação; nível 3: ausência de herbicida com inoculação; nível 4: ausência de herbicida sem inoculação.

Fonte: Próprio autor, 2023.

Para o fator combinação de plantas, a produção de massa seca foi superior nas combinações 1, 2, 3, 4 e 8 (Tabela 12), evidenciado principalmente nas parcelas com a presença de mais e uma espécie de leguminosa.

A combinação 5, refere-se ao tratamento sem a presença de planta, este, apresentou menor produção de massa seca, o que indica que, de maneira geral, o herbicida controlou a incidência de plantas daninhas. As combinações 6 e 7, referem-se ao feijão-de-porco, e à mucuna, respectivamente, estes tratamentos foram semelhantes ao tratamento sem a presença de plantas, indicando que estas plantas isoladas não seriam recomendadas, por exemplo, para cobertura morta do solo.

A crotalária (combinação 8), quando comparada com o feijão-de-porco e mucuna em cultivo isolado, apresentou maior produção de massa seca, com isso, apresenta maior potencial para fitorremediar o sulfentrazone, apresentando bom crescimento e maior acúmulo de biomassa seca mesmo na presença do herbicida, corroborando com os resultados encontrados por Maladão *et al.* (2012a), que aponta a crotalária como espécie mais eficiente na descontaminação de sulfentrazone, quando comparada com outras três espécies, sendo uma delas, o feijão de porco; e por Santos *et al.* (2019), em que a *Crotalaria* apresenta maior incremento na massa fresca e seca dentre as leguminosas estudadas (Tabela 12).

Tabela 12 - Produção de massa seca para as espécies leguminosas submetidas a cultivo em comunidade e isoladas, em solo contendo resíduo de herbicida sulfentrazone.

Combinações	Massa seca, g
1 (FP + CR + MU)	242,74 d
2 (FP + CR)	220,41 cd
3 (FP + MU)	203,38 bcd
4 (CR + MU)	247,74 d
5 (AP)	106,56 a
6 (FP)	131,04 ab
7 (MU)	135,92 abc
8 (CR)	161,10 abcd

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey.

Fonte: Próprio autor, 2023.

A combinação 4, consórcio de crotalária e mucuna, apresentou produção de massa seca 53 % superior ao cultivo isolado de crotalária e 82 % superior ao cultivo isolado de mucuna. A mesma lógica pode ser aplicada também à combinação 3 (consórcio de feijão de porco e mucuna), comparando a produção da comunidade com as plantas isoladas. Esta superioridade

na produção de massa seca pela combinação das plantas produz efeitos positivos tanto sobre a fitorremediação do sulfentrazone, quanto no aumento da cobertura morta do solo, necessitando de estudos em relação custos de produção para o cultivo de mais de uma espécie.

Se considerarmos os consórcios, o de mucuna e crotalária seria o mais indicado. Quando a comparação ocorre entre o cultivo de plantas isoladas, a crotalária é mais eficiente que as demais, assim como verificado na avaliação de intoxicação. Outra observação que evidencia a eficiência da crotalária é que, quando o consórcio de qualquer uma das outras espécies é combinado com ela, a produção aumenta em relação ao consórcio feito entre feijão-de-porco e mucuna (Tabela 12).

Sendo assim, a mucuna isolada não seria uma boa opção para fitorremediar resíduos de sulfentrazone, uma vez que não obteve um desenvolvimento satisfatório na presença do herbicida. Já a crotalária, tanto isolada, quanto em consórcio se mostrou eficiente, assim como mostrado pelos resultados de Maladão *et. al* (2012; 2013).

5 CONCLUSÃO

A crotalária é a espécie leguminosa com maior potencial para a fitorremediação do herbicida sulfentrazone.

O consórcio da crotalária com a mucuna também apresentou alto potencial fitorremediador, sendo recomendada a implantação das duas espécies, mediante estudos de custos.

A inoculação das espécies não causou efeito positivo para a fitorremediação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRUDA, J. S.; LOPES, N, F; BACARIN, M. A. **Nodulação e fixação do dinitrogênio em soja tratada com sulfentrazone**. Revista Agropecuária Brasileira. Brasília, DF, 2001.
- ASOCIATION LATINO AMERICANA DE MALEZAS ALAM. **Recomendaciones sobre unificación de los sistemas de evaluación em ensayos de control de malezas**. ALAM, v. 1, p. 35-38, 1974.
- BANZATTO,D.A., KRONKA,S.N. **Experimentação agrícola**. 4.ed. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 237p.
- BELO, A. F. *et al.* **Efeito da densidade populacional de *Crotalaria juncea* na fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone**. XXXIV Congresso Nacional de Ciência do Solo, Florianópolis, SC, 2013.
- BELO, A. F. *et al.* **Potencial de espécies vegetais na remediação de solo contaminado com sulfentrazone**. Planta Daninha, Viçosa, MG, 2011.
- BRUM, C. S.; FRANCO, A.; JÚNIOR, R. P. S. **Degradação do herbicida sulfentrazone em dois solos de Mato Grosso do Sul**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, n.5, p.558–564. Campina Grande, PB, 2013.
- CARVALHO, A. J. E. **Competição entre plantas daninhas e cultura**. 2021
- CARVALHO, A. J. E. **Fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone utilizando *Crotalaria spectabilis*, *Mucuna pruriens* e *Avena strigosa***. XXXI Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas, Rio de Janeiro, 2018.
- CARVALHO, F. T.; GALBIATTI JR., W.; CAVAZZANA, M. A. **Eficiência do Herbicida Sulfentrazone no Controle em Pré-emergência de Plantas Daninhas em Soja**. Revista Brasileira de Herbicidas v.1, n.1, 2000.
- COSTA, V. S. **Rizobactérias na Fitorremediação de Solos**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2019.
- CURRAN, W. S. **Persistence of herbicides in soil**. Agronomy Facts 36. Published by Penn State College of Agricultural Sciences research and extension programs, 2001.
- DIAS, G. L. S. **Sintomas de Intoxicação de Culturas por Herbicidas**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.
- EMBRAPA. **Manejo Agroecológico do Solo: os Benefícios da Adubação Verde**. Teresina, PI, 2009.
- EMBRAPA. **Herbicidas: Mecanismos de ação e uso**. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, 2008.
- EMBRAPA. **Resistência de plantas daninhas a herbicidas: conceitos, origem e evolução**. Passo Fundo, RS, 2006.

KAWASAKI, A.; WARREN, C. R.; KERTESZ, M. A. **Influência específica do trevo branco na comunidade microbiana da rizosfera em resposta à contaminação por hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH)**. Springer International Publishing, Suíça, 2015.

MALADÃO, J. C. *et al.* **Fitorremediação de solos contaminados com o herbicida sulfentrazone por espécies de adubos verdes**. *Revistas de Ciências Agrárias*, v. 55, n. 4, p. 288-296, out./dez. 2012a.

MALADÃO, J. C. *et al.* **Susceptibilidade de espécies de plantas com potencial de fitorremediação do herbicida sulfentrazone**. *Revista Ceres*, v. 60, n.1, p. 111-121, Viçosa, 2013.

MALADÃO, J. C. *et al.* **Uso de leguminosas na fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone**. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 42, n. 4, p. 390-396, Goiânia, GO, 2012.

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, Botucatu, SP, 2011.

MESCHEDE, K. D. **Período Anterior a Interferência de Plantas Daninhas em Soja: Estudo de caso com Baixo Estande e Testemunhas Duplas**. *Planta Daninha*, Viçosa, MG, 2004.

MENDES, K. F.; DIAS, R. C.; REIS M. R. **Carryover e persistência de herbicidas em solos**. *Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas*.

MONQUEIRO, P. A. *et al.* **Lixiviação e Persistência dos Herbicidas Sulfentrazone e Imazapic**. *Planta Daninha*, v. 28, n. 1, p. 185-195, Viçosa, MG, 2010.

NOGUEIRA, N. P. **Utilização de Leguminosas Para Recuperação de Áreas Degradadas**. *Enciclopédia Biosfera*, Centro Científico Conhecer, v.8, n.14, Goiânia, GO, 2012.

OLIVEIRA JR, R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Copyright 2011 Ominipax Editora Ltda. Curitiba, PR, 2011.

PATEL, F. **Eficiência Agronômica e Persistência de Herbicidas Pré-emergentes na Cultura da Soja**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2018.

PIRES F. R. *et al.* **Seleção de Plantas com Potencial para Fitorremediação de Tebuthiuron**. *Planta Daninha*, v.21, n.3, p.451-458, Viçosa, MG, 2003.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. Londrina: IAPAR, 2005

SANTOS, H. C. **Efeito da Adubação Verde nos Atributos Físico-químicos do Solo no Extremo Norte Tocantinense**. *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC*, Palmas, TO, 2019.

SANTOS, M. S. **Benefícios e limitações do uso de herbicidas pré-emergentes**. + Soja, 2022.

SIMPLÍCIO, F. J. T. **Herbicida sulfentrazone no controle de plantas daninhas em pós-emergência inicial na cultura da cana-de-açúcar.** Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia, v.11, n.1, p.99-103, Guarapuava-PR, 2018.

SILVA, Nailton José Sant'anna. **Espaçamento e população de plantas de milho consorciado com *Brachiaria brizantha*.** Viçosa, MG, 2013.

ZILLI, J. E. *et al.* **Rascunho da Sequência do Genoma de *Bradyrhizobium elkanii* BR 2003, uma cepa de rizóbio eficiente para *Cajanus*, *Canavalia*, *Crotalária*, e *Indigofera*.** Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ, 2020.