

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS ERECHIM
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE MESTRADO

TAILANA IAGER

**FITORREMEDIÇÃO COMO FERRAMENTA DE SUSTENTABILIDADE NA
PRODUÇÃO AGRÍCOLA**

ERECHIM

2026

TAILANA IAGER

**FITORREMEDIAÇÃO COMO FERRAMENTA DE SUSTENTABILIDADE NA
PRODUÇÃO AGRÍCOLA**

Dissertação de mestrado, apresentada para o Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. D. Sc. Leandro Galon

ERECHIM

2026

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Iager, Tailana
FITORREMEDIAÇÃO COMO FERRAMENTA DE SUSTENTABILIDADE
NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA / Tailana Iager. -- 2026.
74 f.:il.

Orientador: Prof. D. Sc. Leandro Galon

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da
Fronteira Sul, Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Tecnologia Ambiental, Erechim,RS, 2026.

1. Adubação verde, diuron, despoluição,
sulfentrazone, sustentabilidade.. I. Galon, Leandro,
orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III.
Título.

Elaborada pelo sistema de Geração Automática de Ficha de Identificação da Obra pela UFFS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

TAILANA IAGER

**FITORREMEDIAÇÃO COMO FERRAMENTA DE SUSTENTABILIDADE NA PRODUÇÃO
AGRÍCOLA**

Dissertação de mestrado, apresentada para o Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 29/07/2026

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
LEANDRO GALON
Data: 25/08/2026 15:08:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. D. Sc. Leandro Galon – UFFS
Orientador



Documento assinado digitalmente
GERMANI CONCENCO
Data: 26/08/2026 13:25:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

D. Sc. Germani Concenço – Embrapa Clima Temperado
Avaliador externo



Documento assinado digitalmente
IGNACIO ASPIAZU
Data: 27/08/2026 16:35:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. D. Sc. Ignacio Aspiazú - UNIMONTES
Avaliador externo

Dedico este trabalho ao meu filho Samuel,
meu noivo Julciano e aos meus pais Valderi e
Rosilene, os quais são meu suporte, minha
fortaleza e a razão de cada conquista em minha
vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pela minha vida, por ser minha fortaleza em todos os momentos e por tornar possível a realização de mais este sonho tão importante em minha trajetória.

À minha família, por ser o suporte de toda a minha caminhada. Ao meu noivo Julciano, por acreditar em meus sonhos e pelo incentivo, compreensão e companheirismo. Seu amor torna meus dias mais leves e felizes. Ao meu filho Samuel, que desde a descoberta de sua chegada me tornou mais forte e determinada, mostrando-me o verdadeiro valor da vida. Aos meus pais, Valderi e Rosilene, que desde cedo me incentivaram aos estudos, sempre acreditaram em mim e nunca deixaram faltar amor e acolhimento.

Ao meu orientador Prof. D. Sc. Leandro Galon, por todo suporte, dedicação, paciência, e compreensão ao longo desta caminhada. Agradeço, especialmente, por acreditar em mim e por seus conselhos em momentos importantes, tanto na vida acadêmica quanto na pessoal, demonstrando cuidado e preocupação.

Aos membros do grupo de pesquisa MASSA (Manejo Sustentável dos Sistemas Agrícolas), pelo empenho, dedicação e colaboração na condução das pesquisas e no fortalecimento do grupo dentro da universidade.

Aos colegas e amigos que compartilharam momentos de aprendizado, desafios e conquistas ao longo desta jornada. Em especial, à minha amiga Gabrieli Enge Zamboni, sempre disposta a ajudar, oferecendo apoio, bons conselhos e incentivo constante, sendo fundamental para a conclusão desta etapa.

À Universidade Federal da Fronteira Sul e ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, pela oportunidade de realização do mestrado e por toda a estrutura disponibilizada para a realização da pesquisa.

Aos professores do programa pelos conhecimentos transmitidos e pela contribuição em minha formação acadêmica e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, estiveram ao meu lado e contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO GERAL

O uso de plantas de cobertura como estratégia para a remediação de solos contaminados com herbicidas residuais tem se mostrado uma alternativa promissora e sustentável. Foram conduzidos dois experimentos, com o objetivo de avaliar o potencial fitorremediador de diferentes espécies vegetais cultivadas em solos contaminados com diuron e sulfentrazone, aplicados isoladamente e em combinação. O experimento I foi conduzido em casa-de-vegetação, em delineamento fatorial $8 \times 3 \times 3$, envolvendo as espécies *Avena strigosa*, *Vicia sativa*, *Secale cereale*, *Raphanus sativus*, *Fagopyrum esculentum*, *Lolium multiflorum*, *Lupinus albus* e uma mistura dessas espécies. Os herbicidas diuron (490 g ha^{-1}), sulfentrazone (245 g ha^{-1}) e diuron+sulfentrazone ($490 + 245 \text{ g ha}^{-1}$) foram aplicados em três doses (testemunha sem herbicida, dose recomendada e o dobro da dose recomendada). Posteriormente, *Cucumis sativus* foi semeada como espécie bioindicadora no solo previamente cultivado com as espécies avaliadas. Foram determinadas a fitotoxicidade das espécies com potencial fitorremediador, juntamente com as variáveis fisiológicas, incluindo taxa fotossintética (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), taxa de transpiração (E , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração de CO_2 sub-estomática (C_i , $\mu\text{mol mol}^{-1}$), eficiência do uso da água (EUA, $\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$), a área foliar e massa seca da parte aérea das espécies. Para a espécie bioindicadora, também foram avaliadas a fitotoxicidade, a área foliar e a massa seca da parte aérea. O diuron apresentou menor persistência residual, enquanto o sulfentrazone demonstrou maior toxicidade. A aplicação combinada resultou em efeitos sinérgicos a depender da espécie fitorremediadora utilizada. As espécies *L. albus*, *A. strigosa*, *R. sativus*, *L. multiflorum*, *S. cereale* e a mistura de espécies apresentaram maior tolerância e capacidade de fitorremediação, favorecendo a recuperação da atividade fisiológica das plantas e reduzindo a fitotoxicidade na cultura sucessora. O experimento II foi conduzido em condições de campo para avaliar o potencial fitorremediador das mesmas espécies estudadas no experimento I na remediação do solo tratado com diuron (490 g ha^{-1}), sulfentrazone (245 g ha^{-1}) e diuron+sulfentrazone ($490 + 245 \text{ g ha}^{-1}$). *Sorghum bicolor* e *Helianthus annuus* foram utilizados como espécies bioindicadoras. Avaliaram-se a fitotoxicidade e a massa seca da parte aérea das plantas de cobertura, as variáveis fisiológicas e os componentes de rendimento de grãos das espécies bioindicadoras. O diuron causou menor fitotoxicidade às plantas com potencial fitorremediador, enquanto *S. cereale* não apresentou alteração na produção de massa seca quando exposto a qualquer um dos tratamentos com herbicidas. As respostas das espécies bioindicadoras em relação às trocas gasosas após a fitorremediação do solo diferiram entre os tratamentos. A produtividade de *S. bicolor* foi superior quando *L. multiflorum*, a mistura de espécies e *A. strigosa* foram utilizadas

para a remediação de solos contaminados com diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone, respectivamente. De forma similar, *H. annuus* apresentou produtividade superior com a utilização das espécies *F. esculentum*, *L. albus* e *A. strigosa* na remediação do solo com diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone respectivamente. A utilização de adubos verdes mostrou-se uma estratégia eficaz para a redução da persistência dos herbicidas diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone no solo. As espécies bioindicadoras apresentaram melhor desempenho quando cultivadas após espécies mais eficientes na remediação do solo, destacando a importância da seleção adequada das plantas de cobertura para mitigar os efeitos residuais dos herbicidas e promover maior sustentabilidade nos sistemas de produção agrícola.

Palavras-chave: Adubação verde, diuron, despoluição, sulfentrazone, sustentabilidade.

ABSTRACT

The use of cover crops as a strategy for the remediation of soils contaminated with residual herbicides has emerged as a promising and sustainable alternative. Two experiments were conducted to evaluate the phytoremediation potential of different plant species grown in soils contaminated with diuron and sulfentrazone, applied individually and in combination. Experiment I was conducted under greenhouse conditions using an $8 \times 3 \times 3$ factorial design, including the species *Avena strigosa*, *Vicia sativa*, *Secale cereale*, *Raphanus sativus*, *Fagopyrum esculentum*, *Lolium multiflorum*, *Lupinus albus*, and a mixture of these species. The herbicides diuron (490 g ha^{-1}), sulfentrazone (245 g ha^{-1}), and diuron + sulfentrazone ($490 + 245 \text{ g ha}^{-1}$) were applied at three rates (untreated control, recommended rate, and twice the recommended rate). Subsequently, *Cucumis sativus* was sown as a bioindicator species in the soil previously cultivated with the phytoremediating species. Phytotoxicity of the phytoremediating species was assessed, together with physiological variables, including net photosynthetic rate (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), stomatal conductance (g_s , $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiration rate (E , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), intercellular CO_2 concentration (C_i , $\mu\text{mol mol}^{-1}$), water use efficiency (WUE, $\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$), leaf area, and shoot dry mass. For the bioindicator species, phytotoxicity, leaf area, and shoot dry mass were also evaluated. Diuron exhibited lower residual persistence, whereas sulfentrazone showed greater toxicity. The combined application of both herbicides resulted in synergistic effects depending on the phytoremediating species. *L. albus*, *A. strigosa*, *R. sativus*, *L. multiflorum*, *S. cereale*, and the species mixture exhibited greater tolerance and phytoremediation capacity, promoting the recovery of plant physiological activity and reducing phytotoxicity in the subsequent crop. Experiment II was conducted under field conditions to evaluate the phytoremediation potential of the same species tested in Experiment I for the remediation of soils treated with diuron (490 g ha^{-1}), sulfentrazone (245 g ha^{-1}), and diuron + sulfentrazone ($490 + 245 \text{ g ha}^{-1}$). *Sorghum bicolor* and *Helianthus annuus* were used as bioindicator species. Phytotoxicity and shoot dry mass of the cover crops were evaluated, as well as physiological variables and grain yield components of the bioindicator species. Diuron caused lower phytotoxicity to the phytoremediating species, whereas *S. cereale* showed no reduction in shoot dry mass production when exposed to any of the herbicide treatments. The gas exchange responses of the bioindicator species following soil phytoremediation differed among treatments. Grain yield of *S. bicolor* was highest when *L. multiflorum*, the species mixture, and *A. strigosa* were used to remediate soils contaminated with diuron, sulfentrazone, and diuron + sulfentrazone, respectively. Likewise, *H. annuus* achieved the highest grain yield when *F. esculentum*, *L. albus*, and *A. strigosa* were used for

the remediation of soils contaminated with diuron, sulfentrazone, and diuron + sulfentrazone, respectively. The use of green manures proved to be an effective strategy for reducing the persistence of diuron, sulfentrazone, and their combination in the soil. The bioindicator species exhibited superior performance when grown after the most efficient phytoremediating species, highlighting the importance of selecting appropriate cover crops to mitigate the residual effects of herbicides and promote greater sustainability in agricultural production systems.

Keywords: Green manure, diuron, decontamination, sulfentrazone, sustainability.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	12
REFERÊNCIAS	16
ARTIGO I- POTENCIAL DAS ESPÉCIES DE COBERTURA DE INVERNO NA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS TRATADOS COM DIURON E SULFENTRAZONE	20
INTRODUÇÃO	22
MATERIAL E MÉTODOS	24
RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
CONCLUSÕES	33
AGRADECIMENTOS	33
REFERÊNCIAS	34
ARTIGO II – POTENCIAL DE ESPÉCIES DE COBERTURA DE INVERNO PARA A FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO TRATADO COM DIURON E SULFENTRAZONE EM CONDIÇÕES DE CAMPO	47
INTRODUÇÃO	49
MATERIAL E MÉTODOS	52
RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
CONCLUSÕES	66
AGRADECIMENTOS	66
REFERÊNCIAS	67
CONSIDERAÇÕES FINAIS	73

INTRODUÇÃO GERAL

A crescente demanda por alimentos, impulsionada pelo aumento populacional, exige a intensificação das práticas agrícolas. No entanto, recursos fundamentais como terras aráveis e água são limitados (Khatri *et al.*, 2024). Estudos e projeções apontam que a população global deva alcançar a marca aproximada de 10,3 bilhões de pessoas na década de 2080 (ONU, 2024). O principal desafio é alcançar maiores produtividades agrícolas, garantindo a segurança alimentar e conciliando com a redução dos impactos ambientais (OECD; FAO, 2025).

A utilização de agrotóxicos é uma prática muito difundida na agricultura mundial em razão de sua elevada eficácia no controle de doenças, insetos e plantas daninhas, contribuindo para se alcançar elevadas produtividades (Tudi *et al.*, 2021). Grandes foram os avanços no controle biológico e manejo integrado de pragas na agricultura, no entanto a classe dos herbicidas ainda está entre os agrotóxicos mais utilizados (Barroso *et al.*, 2023) uma vez que o controle das plantas daninhas é crucial para a obtenção de sucesso na colheita.

As plantas daninhas competem com as culturas pelos recursos disponíveis no meio como água, luz, nutrientes e espaço, podendo reduzir de forma significativa a produtividade das lavouras (Monteiro; Santos, 2022; Yuvraj; Jianjun; Christopher, 2022). Além disso, elas podem atuar como hospedeiras de pragas (Yuvraj; Jianjun; Christopher, 2022) e liberar substâncias alelopáticas, prejudicando o crescimento, desenvolvimento e consequentemente a produtividade e a qualidade dos grãos colhidos.

Diversos métodos são utilizados para o controle das plantas daninhas, incluindo práticas preventivas, culturais, físicas, manejo mecânico e químico (Monteiro; Santos, 2022). No entanto, o manejo químico através do uso de herbicidas, ainda é uma das estratégias mais utilizadas pelos produtores, em virtude da eficácia, praticidade e menor custo ao se comparar com outras formas de controle (Camacho *et al.*, 2022).

Nos últimos anos, houve uma crescente demanda pela utilização de herbicidas pré-emergentes, sendo aplicados no solo antes da emergência da cultura, garantindo que esta possa se desenvolver inicialmente livre da competição ou mesmo para se manejar plantas daninhas resistentes, principalmente ao glyphosate (Parven *et al.*, 2025).

Apesar da praticidade da utilização dos herbicidas na agricultura, o uso intensivo e por vezes indiscriminado desses produtos tem desencadeado crescente preocupação em relação à contaminação ambiental, representando risco à biodiversidade e a segurança alimentar (Parven *et al.*, 2025). O uso contínuo dos herbicidas e com o mesmo mecanismo de ação pode resultar na seleção de biótipos resistentes de plantas daninhas, acarretando dificuldade no controle e

aumento de custos na produção (Mendes *et al.*, 2022). Além disso, leva à utilização de maiores doses dos produtos ou combinação de diferentes moléculas para o controle das plantas daninhas, intensificando os impactos negativos dos herbicidas (Norsworthy *et al.*, 2012; Gazziero, 2015).

No entanto, o comportamento dos herbicidas é influenciado por múltiplos fatores que determinam sua dinâmica no ambiente (Mendes *et al.*, 2023). Os herbicidas podem apresentar elevada persistência no solo, acarretando em acúmulo e lixiviação dos compostos químicos. Esses contaminam corpos hídricos, comprometendo a qualidade da água (Lin; Yang; Xu, 2022). Destaca-se também os prejuízos acarretados a microbiota do solo, a qual é indispensável para a manutenção da fertilidade, desencadeando um desequilíbrio aos ecossistemas (Yasir; Hossain; Pratap-Singh, 2025).

Dentre os herbicidas que merecem maior atenção em relação ao risco de contaminação ambiental encontra-se o diuron e o sulfentrazone, sendo amplamente utilizados na agricultura brasileira e mundial (Asgari; Abdipour; Shadjou, 2023; Gehrke; Camargo; Avila, 2020).

O diuron (3-(3,4-dichlorophenyl) -1,1-dimethylurea) é um herbicida pertencente ao grupo químico das uréias (grupo C2), promove a inibição do fotossistema II, e os sintomas de fitotoxicidade causados por esse aparecem inicialmente nas folhas, com tonalidade verde-claro tornando-se necróticas (Rodrigues; Almeida, 2018). Esse produto é recomendado para as culturas de algodão, café, cana-de-açúcar e citros, tanto em pré como em pós-emergência (AGROFIT, 2026) apresentando um tempo de persistência no solo em torno de 156 dias após a aplicação (Rocha *et al.*, 2013).

Por vez, o sulfentrazone (2',4'-dichloro-5-(4-difluoromethyl-4,5-dihydro-3-methyl-5-oxo-1H-1,2,4-triazol-1-yl) methanesulfonanilide), é um herbicida pertencente ao grupo químico das triazolinonas, inibidor da enzima proporfirinogênio oxidase (Protox/PPO) (Rodrigues; Almeida, 2018). Esse herbicida é recomendado para as culturas de café, cana-de-açúcar, citrus, eucalipto, soja e em áreas não agrícolas (AGROFIT, 2026). É muito utilizado no manejo de plantas daninhas resistentes, principalmente ao glyphosate e inibidores de acetolactato sintase (ALS) (Gehrke; Camargo; Avila, 2020).

A mistura comercial dos herbicidas diuron+sulfentrazone é amplamente utilizada no controle de plantas daninhas, pois a associação destes produtos aumenta o espectro de controle, auxiliando no manejo de espécies de plantas daninhas resistentes a outros herbicidas, principalmente na cultura da soja.

Sabendo do impacto negativo ocasionado pela contaminação através da utilização inadequada dos herbicidas (Wolejko *et al.*, 2022), evidencia-se a necessidade de buscar técnicas de manejo sustentáveis para mitigar esses problemas (Silva; Ribeiro, 2024). Nesse sentido,

torna-se necessário o desenvolvimento de estratégias capazes de reduzir ou mitigar a presença desses compostos no ambiente. A utilização de técnicas para retirar os herbicidas do solo e de águas são importantes, visando a necessidade de solos produtivos saudáveis e água potável para o consumo (Tarla *et al.*, 2020).

A técnica de fitorremediação é uma estratégia de manejo vantajosa para a utilização na remediação do solo contaminado com herbicidas, com baixo custo, onde se utiliza plantas para despoluir o local (Conciani *et al.*, 2023; Kafle *et al.*, 2022). O sucesso para a remediação está relacionado com a espécie vegetal, uma vez que nem todas podem ser utilizadas na fitorremediação, necessitando apresentar algumas características importantes como: capacidade em absorver, metabolizar e degradar o contaminante; produção de biomassa e boa taxa de crescimento; tolerar ambientes adversos (Silva *et al.*, 2023), dentre outros.

O grupo de plantas classificado como gramíneas está sendo estudado como potencial nas aplicações de fitorremediação de solo, devido à capacidade de tolerar condições adversas e rápido crescimento (Rabêlo *et al.*, 2021). Outro grupo muito utilizado para a técnica de fitorremediação são as leguminosas, as quais apresentam sistema radicular desenvolvidos, nódulos fixadores de nitrogênio, grande adaptabilidade ao ambiente e ciclos curtos de desenvolvimento (Liu; Ciric; Bhatti, 2025).

A utilização de plantas de cobertura torna-se uma estratégia vantajosa no contexto de agricultura sustentável, uma vez que contribuem com a vitalidade do solo, prevenção de erosão e ainda, é possível utilizar-se destas plantas para remediar contaminantes do solo (Sharma *et al.*, 2025; Quintarelli *et al.*, 2022). Quando essas são utilizadas em mistura, incluindo leguminosas, podem aumentar os benefícios quando comparado ao plantio de uma única espécie (Pinna *et al.*, 2024) gerando impacto positivo no solo: disponibilização de mais carbono; melhorando a fixação biológica do nitrogênio; redução de compactação e maior infiltração de água (Khangura *et al.*, 2023) o que conseqüentemente, pode aumentar a produtividade das culturas.

A busca pela segurança alimentar e a sustentabilidade agrícola são fundamentais para uma sociedade mais igualitária e saudável (Sridhar *et al.*, 2023). O alcance desse desafio está aliado com vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), dentre eles destaca-se o ODS 2 (Fome zero), ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) e ODS 13 (Combate às alterações climáticas) e, de forma indireta, o ODS 6 (Água potável e saneamento). Para que seja realizada uma ação eficaz sobre essa questão é imprescindível corroboração entre agricultura e novas tecnologias (Pandey; Pandey, 2023).

Diante disso, estuda-se a possibilidade de remediação do solo contaminado com herbicidas a fim de auxiliar em uma agricultura mais sustentável, contribuir com a segurança alimentar e aliado a isso, garantir ao produtor maiores produções e consequentemente proporcionar melhores retornos financeiros à propriedade.

A hipótese deste trabalho é que as espécies vegetais cultivadas no inverno apresentam potencial de remediação do solo contaminado com os herbicidas diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone, aplicados no controle de plantas daninhas infestantes das culturas agrícolas, tornando o solo um local propício para o desenvolvimento das plantas cultivadas em sucessão como bioindicadoras (pepino, girassol e sorgo). Diante disso, objetivou-se avaliar o potencial fitorremediador das espécies de inverno cultivadas em solo contaminado com diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone.

REFERÊNCIAS

- AGROFIT/MAPA. **Sistemas de Agrotóxicos Fitossanitários** - Consulta Aberta, 2026. Disponível em: www.agrofit.agricultura.gov.br/agrofit.
- ASGARI, G.; ABDIPOUR, H.; SHADJOU, A.M. A review of novel methods for Diuron removal from aqueous environments. **Heliyon**, v.9, n.12, e23134, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23134>
- BARROSO, G. M.; SANTOS, E. A.; PIRES, F. R.; GALON, L.; CABRAL, C. M.; SANTOS, J. B. Phytoremediation: A green and low-cost technology to remediate herbicides in the environment. **Chemosphere**, v. 334, p. 138943, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138943>
- CAMACHO, M. E.; GANNON, T. W.; AHMED, K. A.; MULVANEY, M. J.; HEITMAN, J. L.; AMOOZEGAR, A.; LEON, R. G. Evaluation of imazapic and flumioxazin carryover Risk for carinata (*Brassica carinata*) establishment. **Weed Science**, v. 70, n.4, p. 503-513, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1017/wsc.2022.27>
- CONCIANI, P. A.; MENDES, K. F.; SOUZA, R. N. de.; RIBEIRO, A. P.; PIMPINATO, R. F.; TORNISIELO, V. L. Peanut and sorghum are excellent phytoremediators of 14C-tebuthiuron in herbicide-contaminated soil. **Advances in Weed Science**, v. 41, p. e020220068, 2023. DOI: <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2023;41:00002>
- GAZZIERO, D. L. P. Misturas de agrotóxicos em tanque nas propriedades agrícolas do Brasil. **Planta Daninha**, v.33, p.83-92, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582015000100010>
- GEHRKE, V. R.; CAMARGO, E. R.; AVILA, L. A. Sulfentrazone: Environmental Dynamics and Selectivity. **Planta Daninha**, v. 38, e020215663, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582020380100032>
- KAFLE, A.; TIMILSINA, A.; GAUTAM, A.; ADHIKARI, K.; BHATTARAI, A.; ARYAL, N. Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agentes. **Environmental Advances**, v.8, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>
- KHANGURA, R.; FERRIS, D.; WAGG, C.; BOWYER, J. Regenerative Agriculture-a literature review on the practices and mechanisms used to improve soil health. **Sustainability**, v.15, n.3, p.2338, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15032338>
- KHATRI, P.; KUMAR, P.; SHAKYA, K.S.; KIRLAS, M. C.; KANT, K. Understanding the intertwined nature of rising multiple risks in modern agriculture and food system. **Environment, Development and Sustainability**, v.26, p.24107–24150, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03638-7>
- LIN, L.; YANG, H.; XU, X. Effects of water pollution on human health and disease heterogeneity: a review. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 880246, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246>
- LIU, H.; CIRIC, L.; BHATTI, M. Phytoremediation of organic pollution using leguminous plants and auxiliary additives: principles and advantages. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 12, n.98, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-025-00797-9>

- MENDES, F.; SOUZA, R. N. de.; COSTA, A. L. da.; GODOI JUNIOR, M. A. **Understanding the environmental behavior of herbicides: a systematic review of practical insights.** In: Pesticides - Agronomic Application and Environmental Impact. IntechOpen, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002280>
- MENDES, K. F.; MIELKE, K. C.; CRUZ, R. A. L.; SILVA, A. A. da.; FERREIRA, E. A.; VARGAS, L. **Evolution of Weed Resistance to Herbicides.** In: Mendes, K.F., Alberto da Silva, A. (eds) Applied Weed and Herbicide Science. Chapter 7, p. 207-253, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-01938-8_7
- MONTEIRO, A.; SANTOS, S. Sustainable Approach to Weed Management: The Role of Precision Weed Management. **Agronomy**, v.12, p.118, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12010118>
- NORSWORTHY, J. K.; WARD, S. M.; SHAW, D. R.; LLEWELLYN, R. S.; NICHOLS, R. L.; WEBSTER, T. M.; BRADLEY, K. W.; FRISVOLD, J.; POWLES, S. B.; BURGOS, N. R. Reducing the risks of herbicide resistance: best management practices and recommendations. **Weed Science**, v.60, p.31-62, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1614/WS-D-11-00155.1>
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD); FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034. **OECD Publishing**, Paris/FAO, Rome, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1787/601276cd-en>
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Peace, dignity and equality on a healthy planet. **Population: Our growing population**, 2024. Disponível em: <https://www.un.org/en/global-issues/population>
- PANDEY, P. C.; PANDEY, M. Highlighting the role of agriculture and geospatial technology in food security and sustainable development goals. **Sustainable Development**, v.31, p. 3175-3195, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/sd.2600>
- PARVEN, A.; MEFTAUL, I. Md.; VENKATESWARLU, K.; MEGHARAJ, M. Herbicides in modern sustainable agriculture: environmental fate, ecological implications, and human health concerns. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v.22, p. 1181-1202, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05818-y>
- PINNA, M. V.; DIQUATTRO, S.; GARAU, M.; ROGGERO, P. P.; CASTALDI, P.; GARAU, G. Combining biochar and grass-legume mixture to improve the phytoremediation of soils contaminated with potentially toxic elements (PTEs). **Heliyon**, v.10, n.5, p.e26478, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26478>
- QUINTARELLI, V.; RADICETTI, E.; ALLEVATO, E.; STAZI, S.R.; HAIDER, G.; ABIDEEN, Z.; BIBI, S.; JAMAL, A.; MANCINELLI, R. Cover Crops for Sustainable Cropping Systems: A Review. **Agriculture**, v.12, n. 12, p. 2076, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12122076>
- RABÊLO, F. H. S.; VANGRONSVELD, J.; BAKER, A. J. M.; VAN DER ENT, A.; ALLEONI, L. R. F. Are Grasses Really Useful for the Phytoremediation of Potentially Toxic Trace Elements? A Review. **Frontiers in Plant Science**, v.12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.778275>
- ROCHA, P. R. R.; FARIA, A. T.; SILVA, G. S. da.; QUEIROZ, M. E. L. R. de.; GUIMARÃES, F. C. N.; TIRONI, S. P.; GALON, L.; SILVA, A. A. da. Meia-vida do diuron

em solos com diferentes atributos físicos e químicos. **Ciência Rural**, v.43, n.11, p.1961-1966, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013001100007>

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. de. **Guia de herbicidas**. 7. ed. Londrina-PR: Midiograf, 2018.

SHARMA, P.; REITZ, T.; SINGH, S. P.; WOEEICH, A.; MUEHE, E. M. Going beyond improving soil health: cover plants as contaminant removers in agriculture. **Trends in Plant Science**, v. 30, n.5, p. 539-552, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2025.01.009>

SILVA, C. I.; RIBEIRO, K. da S. O impacto do uso de pesticidas nos recursos hídricos: uma revisão sistemática. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 15, n. 11, p. e4220, 2024. DOI: <https://doi.org/10.7769/gesec.v15i11.4220>

SILVA, J. da.; ROSA, G. B.; SGANZERLA, W. G.; FERRAREZE, J. P.; SIMIONI, F. J.; CAMPOS, M. L. Strategies and prospects in the recovery of contaminated soils by phytoremediation: an updated overview. **Communications in Plant Science**, v. 13, p.001-012, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.26814/cps2023001>.

SRIDHAR, A.; PONNUCHAMY, M.; KUMAR, P. S.; KAPOOR, A.; NGUYEN VO, D.; RANGASAMY, G. Digitalization of the agro-food sector for achieving sustainable development goals: a review. **Sustainable Food Technology**, v.1, p. 783-802, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3FB00124E>

TARLA, D. N.; ERICKSON, L. E.; HETTIARACHCHI, G. M.; AMADI, S. I.; GALKADUWA, M.; DAVIS, L. C.; NURZHANOVA, A.; PIDLISNYUK, V. Phytoremediation and bioremediation of pesticide-contaminated soil. **Applied Sciences**, v.10, n.4, p.1217, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10041217>

TUDI, M.; RUAN, H. D.; WANG, L.; LYU, J. SADLER, R.; CONNELL, D.; CHU, C. PHUNG, D. T. Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.18, n.3, p.1112, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>

WOŁEJKO, E.; WYDRO, U.; ODZIEJEWICZ, J. I.; KORONKIEWICZ, A.; JABŁOŃSKA-TRYPUĆ, A. Biomonitoring of Soil Contaminated with Herbicides. **Water**, v.14, n.10:1534, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14101534>

YASIR, M.; HOSSAIN, A.; PRATAP-SINGH, A. Pesticide Degradation: Impacts on Soil Fertility and Nutrient Cycling. **Environments**, v.12, n.8, p.272, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments12080272>

YUVRAJ, K.; JIANJUN, C.; CHRISTOPHER, M. S. Allelopathy and its application as a weed management tool: A review. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1034649>

APRESENTAÇÃO DOS TRABALHOS

O presente trabalho foi estruturado em formato de artigos, com o objetivo de aprofundar os estudos em relação à utilização de plantas de cobertura como fitorremediadoras de herbicidas residuais presentes no solo. Esses artigos serão submetidos à análise em periódico de relevância, com o objetivo de publicação e divulgação dos resultados obtidos.

Os artigos foram desenvolvidos por meio de resultados obtidos em dois experimentos, sendo um conduzido em casa-de-vegetação e outro a campo. Objetivou-se verificar o potencial de fitorremediação de diferentes espécies vegetais, cultivadas em solo tratado com os herbicidas diuron, sulfentrazone e a mistura formulada comercialmente composta de diuron+sulfentrazone.

No primeiro experimento, instalado em casa-de-vegetação, foram cultivadas diferentes espécies de cobertura em solo tratado com doses dos herbicidas diuron, sulfentrazone e diuron + sulfentrazone utilizando-se posteriormente plantas de pepino como bioindicadora da remediação ou não dos produtos aplicadas ao solo.

No segundo experimento as diferentes espécies vegetais foram cultivadas a campo e utilizou-se somente uma dose dos herbicidas e, como plantas bioindicadoras utilizou-se o girassol e o sorgo.

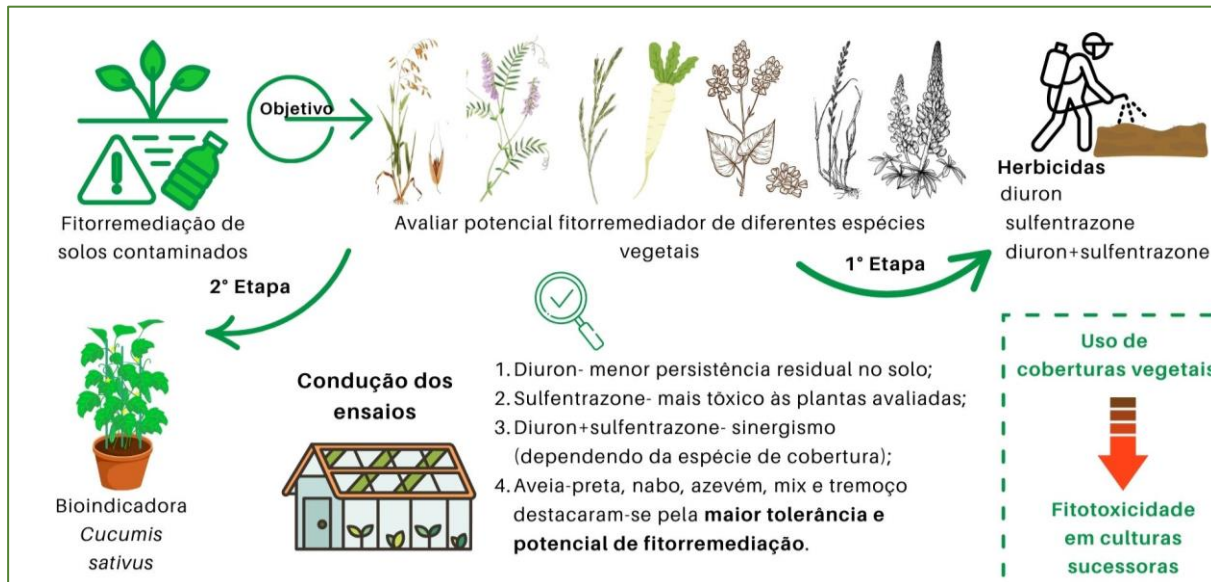
Diante disso, os artigos foram divididos dessa forma:

ARTIGO I- Potencial das espécies de cobertura de inverno na fitorremediação de solos tratados com diuron e sulfentrazone.

ARTIGO II – Potencial de espécies de cobertura de inverno para a fitorremediação de solo tratado com diuron e sulfentrazone em condições de campo.

ARTIGO I- POTENCIAL DAS ESPÉCIES DE COBERTURA DE INVERNO NA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS TRATADOS COM DIURON E SULFENTRAZONE

Resumo gráfico



RESUMO - A fitorremediação é uma estratégia promissora para a remediação de solos, utilizando espécies vegetais como agentes despoluidores. Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial fitorremediador de diferentes espécies de plantas de cobertura, cultivadas isoladamente e em mistura, em solo tratado com herbicidas de efeito residual (diuron e sulfentrazone), bem como seus impactos sobre uma cultura bioindicadora em sucessão. Foram conduzidos dois experimentos em casa-de-vegetação. No primeiro, avaliaram-se oito tratamentos de cobertura: aveia preta, ervilhaca, centeio, nabo, trigo mourisco, azevém, tremoço e a mistura dessas espécies, submetidos a três tratamentos com herbicidas (diuron, sulfentrazone e a mistura de ambos), em três doses (0, 1x e 2x a dose recomendada), em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial (8 x 3 x 3), com quatro repetições. Aos 28 dias após a emergência (DAE), foi determinada a fitotoxicidade das espécies. Aos 30 DAE, avaliaram-se as trocas gasosas (fotossíntese, condutância estomática, transpiração, concentração interna de CO₂ e eficiência no uso da água), a área foliar e a massa seca das plantas. No segundo experimento, utilizou-se o solo proveniente do ensaio anterior para o cultivo de pepino como espécie bioindicadora da remediação do solo tratado com os herbicidas. A fitotoxicidade ao pepino foi avaliada aos 7, 14 e 21 DAE, e a área foliar e massa seca aos 30 DAE. Os resultados indicaram menor persistência residual do diuron, enquanto o sulfentrazone

apresentou maior toxicidade às plantas avaliadas. A mistura dos herbicidas evidenciou efeito sinérgico, cuja intensidade variou conforme a espécie de cobertura. Aveia preta, nabo, azevém, tremoço e a mistura de espécies destacaram-se pela maior tolerância aos herbicidas e maior potencial fitorremediador, especialmente em relação ao diuron e à mistura dos herbicidas. Conclui-se que o uso de espécies de cobertura tolerantes pode reduzir a fitotoxicidade em culturas sucessoras, atuando como ferramenta eficaz na remediação de solos por herbicidas residuais e contribuindo para sistemas de manejo químico mais sustentáveis.

Palavras-chave: Adubos verdes, *Cucumis sativus*, diuron, fitorremediação, sulfentrazone.

PHYTOREMEDIATION POTENTIAL OF WINTER COVER CROP SPECIES IN SOILS TREATED WITH DIURON AND SULFENTRAZONE

ABSTRACT - Phytoremediation is a promising strategy for the remediation of contaminated soils, using plant species as biological decontaminating agents. This study aimed to evaluate the phytoremediation potential of different cover crop species, grown individually and in mixtures, in soil treated with residual herbicides (diuron and sulfentrazone), as well as their effects on a subsequent bioindicator crop. Two greenhouse experiments were conducted. In the first experiment, eight cover crop treatments were evaluated: black oat, common vetch, rye, oilseed radish, buckwheat, annual ryegrass, white lupin, and a mixture of these species. These treatments were subjected to three herbicide treatments (diuron, sulfentrazone, and their combination), applied at three rates (0, 1×, and 2× the recommended rate), in a randomized complete block design arranged in an 8 × 3 × 3 factorial scheme with four replications. Phytotoxicity of the cover crop species was assessed at 28 days after emergence (DAE). At 30 DAE, gas exchange variables, including net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, intercellular CO₂ concentration, and water use efficiency, as well as leaf area and shoot dry mass, were determined. In the second experiment, soil from the previous trial was used to grow cucumber as a bioindicator species to assess the remediation of herbicide-treated soil. Cucumber phytotoxicity was evaluated at 7, 14, and 21 DAE, whereas leaf area and shoot dry mass were determined at 30 DAE. The results indicated lower residual persistence of diuron, whereas sulfentrazone exhibited greater toxicity to the evaluated species. The combined application of the herbicides showed a synergistic effect, the magnitude of which varied according to the cover crop species. Black oat, oilseed radish, annual ryegrass, white lupin, and the species mixture showed greater herbicide tolerance and higher phytoremediation

potential, particularly for diuron and the herbicide mixture. It was concluded that the use of herbicide-tolerant cover crop species can reduce phytotoxicity in subsequent crops, serving as an effective strategy for the remediation of soils contaminated with residual herbicides and contributing to more sustainable chemical weed management systems.

Keywords: Green manures, *Cucumis sativus*, diuron, phytoremediation, sulfentrazone.

INTRODUÇÃO

A intensificação dos sistemas agrícolas ampliou a dependência dos herbicidas como principal estratégia de manejo de plantas daninhas. Isso se deve à elevada eficiência, praticidade e menor custo desses produtos em comparação com outros métodos de controle (Camacho *et al.*, 2022; Nath *et al.*, 2024). Este cenário está diretamente associado ao aumento da demanda por alimentos impulsionado pelo crescimento populacional, bem como à limitação de recursos naturais essenciais, como água e terras aráveis, o que impõe o desafio de aumentar a produtividade agrícola e, simultaneamente, promover sistemas de produção mais sustentáveis (Pretty, 2018; Fitton *et al.*, 2019; Khatri *et al.*, 2024; Wang, 2022). Assim, torna-se igualmente importante desenvolver estratégias que reduzam os impactos ambientais decorrentes do uso intensivo de herbicidas.

No Brasil, observa-se um aumento expressivo na comercialização de agrotóxicos, com destaque para os herbicidas, que representam a maior proporção dos produtos aplicados nas lavouras (Procópio *et al.*, 2024; Sindiveg, 2025). Apesar dos benefícios agronômicos, o uso intensivo e, por vezes, inadequado desses compostos tem gerado preocupações ambientais e agronômicas relevantes, como a contaminação de áreas não-alvo, a lixiviação para corpos hídricos e a persistência no solo (Ghazi *et al.*, 2023). Nesse contexto, a persistência dos herbicidas no ambiente pode resultar em efeito residual e ocasionar *carryover*, comprometendo o desenvolvimento de culturas sucessoras sensíveis.

Entre os herbicidas registrados para uso na agricultura brasileira destacam-se o diuron e o sulfentrazone, empregados em culturas como soja, cana-de-açúcar, café, citros e eucalipto (AGROFIT, 2026). O diuron atua como inibidor do fotossistema II (Lu *et al.*, 2018) e apresenta elevada persistência no solo, com meia vida em torno de 156 dias (Tandon *et al.*, 2019; Rocha *et al.*, 2013). O sulfentrazone atua como inibidor da enzima protoporfirinogênio oxidase (PROTOX), essencial para a biossíntese de tetrapirróis, como a clorofila (Rodrigues; Almeida, 2018). Esse herbicida destaca-se por sua elevada persistência no solo e longo efeito residual — apresentando meia-vida média de 150 dias, que pode variar entre 121 e 302 dias conforme o

solo e o clima (Gehrke; Camargo; Avila, 2020; Damin; Carrijo; Costa, 2021), o que resulta em elevado risco de *carryover*.. Além disso, a utilização da mistura diuron+sulfentrazone em sistemas agrícolas, especialmente em aplicações em pré-emergência, tem sido empregada visando ampliar o espectro de controle de plantas daninhas, incluindo espécies resistentes ou tolerantes ao glyphosate ou a outros herbicidas (Sousa *et al.*, 2020; Galon *et al.*, 2022; Albrecht *et al.*, 2023). No entanto, ainda são limitados os estudos que avaliam a persistência dessa mistura no solo e o potencial de seus efeitos residuais sobre culturas sucessoras.

O comportamento e a persistência dos herbicidas no ambiente são influenciados por fatores relacionados às propriedades físico-químicas das moléculas, às condições ambientais e às características do solo, como pH, teor de matéria orgânica, textura e a capacidade de troca catiônica (Takeshita *et al.*, 2019; Mendes *et al.*, 2023). Nesse sentido, práticas como o cultivo de plantas de cobertura e a adubação verde favorecem a atividade microbiana e aprimoram os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, contribuindo diretamente para a redução da persistência desses compostos (Aliste *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2024).

A fitorremediação tem sido proposta como uma estratégia promissora para a remediação de solos, baseando-se na capacidade de determinadas espécies vegetais de absorver, transformar ou degradar contaminantes, diretamente ou por meio da estimulação da microbiota do solo (Silva *et al.*, 2023). No entanto, a eficiência dessa técnica depende de fatores como a tolerância das espécies aos herbicidas, a capacidade de crescimento em ambientes contaminados e a interação com os processos físico-químicos e biológicos envolvendo solo, herbicida e ambiente (Vasconcelos *et al.*, 2020; Barroso *et al.*, 2023).

Apesar dos avanços na compreensão da fitorremediação, ainda há lacunas quanto ao potencial de espécies de cobertura em fitorremediar herbicidas residuais aplicados isoladamente ou em mistura, especialmente sob condições edafoclimáticas tropicais. Adicionalmente, a resposta de culturas subsequentes como bioindicadoras da eficiência do processo permanece pouco explorada.

Neste contexto, a hipótese deste estudo é que as espécies de cobertura diferem quanto à tolerância e à capacidade de fitorremediação de solos contaminados com diuron e sulfentrazone, aplicados isoladamente ou em mistura, em diferentes doses. Assim, objetivou-se avaliar o potencial fitorremediador de espécies de cobertura em solos tratados com esses herbicidas, utilizando o pepino como planta bioindicadora da persistência residual no solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Condições experimentais e solo

O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação na Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), *Campus Erechim*, nas coordenadas de 27° 43' 26" S, 52° 17' 39" W e 650 m de altitude. As unidades experimentais consistiram de vasos plásticos com capacidade para 8 dm³, preenchidos com Latossolo Vermelho Aluminoférrico típico (Streck *et al.*, 2018), sem histórico de aplicação de herbicidas.

O solo foi coletado na camada de 0,00 a 0,20 m, peneirado com peneira de malha de 4 mm e posteriormente corrigido e adubado conforme as recomendações técnicas para as culturas envolvidas no experimento (SBCS, 2016). As características químicas e físicas do solo foram: pH em água de 4,3; MO = 3,1%; P = 4,8 mg dm⁻³; K = 174,0 mg dm⁻³; Al³⁺ = 2,8 cmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 1,2 cmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 1,2 cmol_c dm⁻³; CTC(t) = 5,7 cmol_c dm⁻³; CTC(TpH=7,0) = 25,7 cmol_c dm⁻³; H+Al = 22,8 cmol_c dm⁻³; SB = 2,9 cmol_c dm⁻³; V = 11,3%; argila = 67%; areia = 11% e silte = 22%.

Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, em fatorial 8 x 3 x 3, com quatro repetições. O fator A correspondeu aos herbicidas: diuron, sulfentrazone e à mistura formulada comercialmente composta por diuron+sulfentrazone, aplicados em pré-emergência. O fator B foi constituído por oito tratamentos de cobertura: aveia preta (*Avena strigosa*), ervilhaca (*Vicia sativa*), centeio (*Secale cereale*), nabo (*Raphanus sativus*), trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum*), azevém (*Lolium multiflorum*), tremoço (*Lupinus albus*) e a mistura dessas espécies (Mix). O fator C correspondeu às doses dos herbicidas: 0 (controle), 1x e 2x a dose recomendada. As doses avaliadas foram: diuron (0, 490 e 980 g i.a. ha⁻¹), sulfentrazone (0, 245 e 490 g i.a. ha⁻¹) e diuron+sulfentrazone (0, 490+245 e 980+490 g i.a. ha⁻¹). A dose recomendada (1x) de diuron+sulfentrazone para soja é de 490+245 g i.a. ha⁻¹, que equivale a 1,4 L ha⁻¹ do produto comercial Stone[®]. As doses recomendadas (1x) para o diuron e o sulfentrazone foram de 490 e 245 g i.a. ha⁻¹, respectivamente, aplicadas tanto isoladamente quanto na mistura de ambos os herbicidas.

A semeadura das espécies com potencial fitorremediador foi realizada com dez sementes por vaso, sendo mantidas duas plantas após o desbaste. Os herbicidas foram aplicados 24 h após a semeadura dessas plantas, utilizando pulverizador costal pressurizado a CO₂, equipado com duas pontas de pulverização tipo leque DG 110.02, sob pressão constante de 210

kPa e velocidade de deslocamento de 3,6 km h⁻¹, o que proporcionou uma vazão de 150 L ha⁻¹ de calda.

A casa-de-vegetação era coberta com plástico transparente (150 µm, com proteção UV), sem controle climático. A temperatura variou de 22 a 31° C, e a irrigação foi realizada quatro vezes ao dia, mantendo o solo próximo à capacidade de campo.

Avaliações do primeiro experimento

A fitotoxicidade das espécies de cobertura foi avaliada aos 28 dias após a emergência (DAE), utilizando uma escala visual, com atribuição de notas de zero (ausência de injúria) a 100% (morte das plantas) de acordo com a metodologia proposta pela SBPCD (1995).

Aos 30 DAE das espécies com potencial fitorremediador, foram aferidas, na primeira folha completamente expandida localizada no terço médio das plantas, as variáveis fisiológicas: taxa fotossintética (A , µmol m⁻² s⁻¹), condutância estomática (g_s , mol m⁻¹ s⁻¹), taxa de transpiração (E , mol H₂O m⁻² s⁻¹) e concentração de CO₂ sub-estomática (C_i , µmol mol⁻¹), utilizando um analisador de gases no infravermelho (IRGA; modelo LCA PRO, Analytical Development Co. Ltd, Hoddesdon, UK), sob iluminação natural, entre 07h00 e 10h00. A eficiência do uso da água (EUA, mol CO₂ mol H₂O⁻¹) foi calculada a partir da razão entre A/E .

Posteriormente, as espécies fitorremediadoras foram seccionadas rente ao solo para determinação da área foliar (AF, cm² vaso⁻¹) e a massa seca da parte aérea (MS, g vaso⁻¹). Para a determinação da AF utilizou-se um medidor eletrônico de área foliar (LICOR-3100) e na sequência as plantas foram acondicionadas em sacos de papel *kraft* e secas em estufa com circulação forçada de ar, a 60±5°C, para determinação da MS.

Segundo experimento

No segundo experimento, o solo utilizado no ensaio anterior, previamente cultivado com as espécies com potencial fitorremediador, foi coletado, peneirado e disposto em vasos plásticos com capacidade de 3 dm³. Com base na análise físico-química do solo, realizou-se a correção da acidez e adubação, conforme as recomendações técnicas (SBCS, 2016), para posterior implantação da cultura do pepino (*Cucumis sativus* L.), utilizada como espécie bioindicadora da persistência residual dos herbicidas no solo.

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, de mesma forma que o experimento anterior. Foram semeadas 12 sementes de pepino por vaso, na profundidade de 0,5 cm, realizando-se o desbaste após a emergência, mantendo-se 5 plantas por unidade experimental.

A fitotoxicidade foi avaliada aos 7, 14 e 21 DAE, utilizando-se a mesma escala visual do experimento anterior. Aos 30 DAE, foram avaliadas a área foliar (AF) e a massa seca da parte aérea (MS) das plantas bioindicadoras, conforme metodologia descrita para o experimento anterior.

Análises estatísticas

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade e homogeneidade das variâncias. Atendidas as pressuposições, realizou-se análise de variância (teste F) e, quando significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se interação significativa entre herbicidas, doses e espécies de cobertura, tanto na fase de cultivo das plantas potencialmente fitorremediadoras quanto na resposta do pepino como bioindicador, evidenciando elevada dependência entre os fatores avaliados.

1. Potencial de espécies de cobertura para fitorremediar solo tratado com os herbicidas diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone

O herbicida diuron resultou em baixa fitotoxicidade para aveia-preta (12,8%) e centeio (10%) quando expostas à dose recomendada (1x) (Tabela 1). Por outro lado, observou-se elevada fitotoxicidade (60 a 100%) na ervilhaca, trigo mourisco e tremoço, independente da dose aplicada. Esse padrão confirma maior tolerância de gramíneas em relação a dicotiledôneas, possivelmente associada a diferenças na absorção, translocação e, principalmente, na capacidade de metabolização do herbicida.

A seletividade do diuron, um inibidor do fotossistema II, tem sido frequentemente relacionada à maior atividade de enzimas de detoxificação, como citocromo P450 e glutathione S-transferases, além da menor translocação para os cloroplastos em espécies tolerantes (Nandula *et al.*, 2019; Yanniccari *et al.*, 2020; Cheng *et al.*, 2022; Goldberg-Cavalleri *et al.*, 2025; Arshad *et al.*, 2025). Entretanto, o aumento da dose (2x) promoveu elevação acentuada da fitotoxicidade no nabo e centeio, indicando que a capacidade metabólica das plantas pode ser excedida, resultando em acúmulo do herbicida e comprometimento do aparato fotossintético (Gaines *et al.*, 2020; Barker *et al.*, 2023; Shahid *et al.*, 2023).

O sulfentrazone apresentou maior variabilidade na resposta entre as espécies (Tabela 1), com menor fitotoxicidade em centeio (13,8%) e tremoço (13%), enquanto o trigo mourisco foi

altamente sensível (100%, independente da dose testada). Fitotoxicidade superior à 40% foi observada na ervilhaca, nabo e azevém, independente da dose do herbicida; e em aveia-preta e no mix de plantas de cobertura na maior dose (2x). Alves *et al.* (2018b) observaram fitotoxicidade de 80% para a aveia-preta e completa mortalidade do trevo quando tratados com o sulfentrazone (600 g ha⁻¹). Esse comportamento está associado ao seu mecanismo de ação como inibidor da PROTOX, que promove acúmulo de protoporfirina IX e geração de espécies reativas de oxigênio. Espécies tolerantes tendem a apresentar maior capacidade antioxidante e eficiência na detoxificação, o que reduz danos oxidativos (Duke *et al.*, 2017; Gehrke; Camargo; Avila, 2020).

Além disso, a interação do herbicida com o solo e com a cobertura vegetal influencia diretamente sua disponibilidade. Espécies como centeio podem favorecer a dissipação do sulfentrazone, possivelmente por estímulo à atividade microbiana e modificação da dinâmica do herbicida no solo (Gehrke; Camargo; Avila, 2020; Macedo *et al.*, 2020).

A aplicação da mistura formulada comercialmente composta de diuron+sulfentrazone resultou em respostas dependentes da espécie, com menor fitotoxicidade em tremoço (20%), azevém (36,8%), o mix de espécies (25,5%) na dose recomendada (1x) (Tabela 1). Esse resultado evidencia que determinadas espécies apresentam capacidade de tolerar simultaneamente herbicidas com diferentes mecanismos de ação, o que representa vantagem importante em sistemas agrícolas onde o uso de misturas é frequente (Silva *et al.*, 2023), sobretudo em sistemas em que é comum o uso sequencial ou em mistura de moléculas com diferentes mecanismos de ação.

As demais espécies apresentaram, em geral, fitotoxicidade entre 42-63%, independentemente da dose de diuron+sulfentrazone, com destaque para nabo e tremoço, com 80 e 100%, respectivamente, na maior dose, e trigo mourisco com 90 e 100% nas doses 1x e 2x, respectivamente, evidenciando a maior sensibilidade desta à mistura dos herbicidas (Tabela 1). Estudos sobre fitorremediação de sulfentrazone demonstram que o grau de sensibilidade inicial da espécie fitorremediadora não impede a degradação do herbicida, mas espécies com sensibilidade maior tendem a ter seu crescimento severamente limitado, reduzindo a produção de biomassa e o potencial de remediação. Assim, a seleção de espécies para fitorremediação deve considerar simultaneamente a tolerância fisiológica e a capacidade de acumular biomassa em presença dos herbicidas (Ferraço *et al.*, 2019; Teófilo *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2023), critérios nos quais o mix e o azevém se destacaram no presente estudo.

O melhor desempenho do mix de espécies reforça o papel da diversidade funcional na rizosfera, uma vez que a combinação de gramíneas e leguminosas pode aumentar a atividade

microbiana, diversificar exsudatos radiculares e favorecer a degradação de compostos xenobióticos (Teófilo *et al.*, 2020; Thapa *et al.*, 2021; Munhoz-Garcia *et al.*, 2024). Dessa forma, o uso de misturas de espécies emerge como estratégia promissora para maximizar a eficiência da fitorremediação.

As variáveis de crescimento corroboram esses resultados. A maior produção de massa seca e área foliar ocorreu no mix de espécies, especialmente sob aplicação do diuron, indica maior resiliência ao estresse químico e maior capacidade de sustentar o processo de remediação (Tabela 2). A manutenção do crescimento em ambientes contaminados é um critério fundamental, uma vez que a eficiência da fitorremediação depende diretamente da produção de biomassa (Ferraço *et al.*, 2019; Teófilo *et al.*, 2020). Estudos recentes que avaliaram o risco de fitotoxicidade de resíduos de diuron em culturas de grãos indicam que, em solos arenosos, pequenas variações na dose podem resultar em reduções expressivas no crescimento e na produção de biomassa. Esses resultados reforçam a importância da dose aplicada e do histórico de uso do herbicida na determinação da resposta das espécies de cobertura (Nandula *et al.*, 2019; Pyone *et al.*, 2024).

A aplicação de sulfentrazone na dose recomendada (1x) promoveu maior acúmulo de massa seca em centeio, nabo e no mix de espécies enquanto a dose elevada (2x) resultou em redução expressiva dessa variável (Tabela 2). Esse comportamento evidencia o efeito dose-dependente do herbicida sobre o crescimento vegetal, refletindo diretamente na produção de biomassa e, consequentemente, no desempenho das culturas subsequentes (Gonçalves *et al.*, 2018). A persistência do sulfentrazone e o risco de fitotoxicidade residual estão fortemente associados às características do solo, como textura e teor de matéria orgânica, além da presença de plantas de cobertura capazes de reduzir sua concentração na solução do solo (Ferraço *et al.*, 2019; Gehrke; Camargo; Avila, 2020; Souza *et al.*, 2023; Ferreira *et al.*, 2024). Neste contexto, a manutenção parcial da área foliar em relação ao controle em aveia-preta, centeio e azevém, bem como o aumento observado no mix de espécies e no tremoço sob a dose 1x, reforça o potencial destas espécies na mitigação dos efeitos residuais do herbicida.

A combinação de diuron+sulfentrazone apresentou efeitos menos pronunciados sobre o crescimento em determinadas espécies, com manutenção da MS em nabo e tremoço e da AF em ervilhaca na dose recomendada (Tabela 2). As menores reduções na massa seca em ervilhaca e nabo indicam maior tolerância fisiológica, provavelmente associada à capacidade de metabolização do herbicida. Leguminosas como a ervilhaca podem apresentar elevada eficiência na degradação de compostos xenobióticos, desde que a dose não exceda sua capacidade de tolerância, o que envolve a manutenção da atividade fotossintética e da

integridade das membranas celulares sob estresse oxidativo (Souto *et al.*, 2020). Adicionalmente, as menores reduções de área foliar em centeio e nabo sob a mistura na dose 1x sugerem que essas espécies, isoladas ou em consórcio, apresentam elevado potencial para utilização em estratégias de manejo de áreas com histórico de aplicação combinada de herbicidas.

Do ponto de vista fisiológico, plantas de aveia preta e trigo mourisco mantiveram altas taxas fotossintéticas, condutância estomática, transpiração e eficiência do uso da água, mesmo após aplicação de 2x a dose recomendada do diuron (Tabela 3). Esse comportamento indica manutenção da eficiência fotossintética mesmo sob ação de um inibidor do fotossistema II, sugerindo a atuação de mecanismos de tolerância associados à regulação estomática e à ativação de sistemas antioxidantes. Estudos anteriores com a mistura sulfentrazone+diuron em soja demonstraram que o diuron reduz a eficiência do FSII e o transporte de elétrons, enquanto o sulfentrazone intensifica a produção de espécies reativas de oxigênio, promovendo estresse oxidativo, afetando conjuntamente o aparato fotossintético. No entanto, espécies com maior capacidade de detoxificação e proteção do FSII, por meio da ativação de enzimas antioxidantes e mecanismos de reparo de proteínas, conseguem manter níveis de *A* e EUA próximos aos observados no controle, mesmo sob exposição a herbicidas com diferentes mecanismos de ação (Ferreira *et al.*, 2024; Amorim *et al.*, 2025).

Em contraste, nabo e azevém apresentaram reduções moderadas de *A* e *gs* na dose recomendada (1x) de diuron, mas queda acentuada na maior dose (2x). Esse padrão é comum em herbicidas inibidores do FSII, que bloqueiam o transporte de elétrons, reduzem a assimilação de carbono e a atividade fotossintética de plantas sensíveis (Battaglini *et al.*, 2021; Franklin *et al.*, 2021).

O sulfentrazone, por sua vez, apresentou menor impacto sobre as variáveis fisiológicas, com manutenção ou aumento da *A* em ervilhaca, centeio, nabo, azevém e no mix de espécies na dose 1x, além da manutenção parcial ou aumento na dose 2x para algumas espécies. A *gs* permaneceu elevada em ervilhaca, nabo e tremoço independentemente da dose aplicada (Tabela 3). A eficiência no uso da água foi semelhante ao controle em ervilhaca (1x e 2x) e em nabo (1x), indicando manutenção do desempenho fisiológico sob estresse químico. Esses resultados estão associados ao mecanismo de ação do sulfentrazone, um inibidor da PROTOX, que leva ao acúmulo de protoporfirina IX e à geração de espécies reativas de oxigênio. Espécies tolerantes tendem a apresentar maior capacidade antioxidante, reduzindo danos oxidativos e preservando a atividade fotossintética (Dayan *et al.*, 2019; Wittmann *et al.*, 2024).

Por outro lado, o sulfentrazone e a mistura diuron+sulfentrazone afetaram drasticamente a *A*, *gs*, *E*, *Ci* e *EUA* em trigo mourisco, independentemente da dose, caracterizando-o como a espécie mais sensível entre as avaliadas (Tabelas 3-5). Herbicidas que afetam a fotossíntese podem alterar diretamente o balanço redox, a integridade de membranas e o metabolismo de carbono, resultando em redução do crescimento e da biomassa (Sharma *et al.*, 2020; Pyone *et al.*, 2024; Amorim *et al.*, 2025).

A aplicação da mistura diuron+sulfentrazone resultou na manutenção de *A* em centeio, azevém, mix e tremoço na dose recomendada (1x), além da manutenção ou aumento em ervilhaca, nabo, azevém, mix e tremoço na dose 2x (Tabela 3). De forma geral, observaram-se altos valores de *gs* e *EUA* na maioria dos tratamentos com a mistura, exceto para o trigo mourisco em ambas as doses e para tremoço na dose 2x. A *EUA* esteve associada à capacidade das espécies em manter a assimilação de carbono sob condições de estresse químico, sendo um atributo desejável em programas de fitorremediação, especialmente em sistemas de sequeiro. Nesse contexto, espécies com altas taxas de *A* e *EUA* sob estresse químico são mais indicadas, pois conciliam crescimento com potencial de remoção de contaminantes do solo (Torres *et al.*, 2012; Dilliot *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2025).

De forma integrada, os resultados indicam que centeio, aveia-preta, azevém, nabo, tremoço, ervilhaca e, principalmente, o mix de gramíneas e leguminosas apresentaram diferentes níveis de tolerância ao diuron, ao sulfentrazone e sua mistura. Essa tolerância provavelmente está associada a mecanismos fisiológicos e bioquímicos como absorção, translocação, metabolização e resposta antioxidante. A manutenção da atividade fotossintética e do crescimento sob presença dos herbicidas, aliada ao potencial de interação com a microbiota do solo, posiciona essas espécies como ferramentas estratégicas para programas de fitorremediação e mitigação de resíduos de herbicidas em sistemas agrícolas.

2. Potencial fitorremediador de espécies de cobertura aos herbicidas diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone em plantas de pepino como bioindicadora

A persistência de resíduos herbicidas no solo após o cultivo das plantas de cobertura foi evidenciada pela fitotoxicidade observada em plantas de pepino cultivadas em sucessão, permitindo inferir o potencial das espécies avaliadas em mitigar ou manter os efeitos residuais dos produtos.

Para o diuron, os menores níveis de fitotoxicidade foram registrados em todas as avaliações (7, 14 e 21 DAE), especialmente na dose recomendada (1x) (Tabela 6). Aos 7 DAE, apenas o solo previamente cultivado com nabo apresentou fitotoxicidade de 6% na dose 2x.

Aos 14 DAE, a fitotoxicidade foi inferior a 11% em solos provenientes do cultivo com ervilhaca, centeio, nabo, trigo mourisco e tremoço sob a maior dose de diuron (2x), reduzindo-se para média de 6,7% aos 21 DAE (Tabela 6). Esses resultados sugerem baixa persistência residual do diuron nas condições avaliadas, possivelmente associada ao efeito das plantas de cobertura na estimulação da atividade microbiana e aceleração dos processos de degradação no solo (Alves *et al.*, 2018a, Sharma *et al.*, 2025).

Em contraste, o sulfentrazone promoveu níveis mais elevados de fitotoxicidade no pepino, variando de 11% (mix e tremoço) a ~36% (nabo e azevém) na dose 1x (Tabela 6). Aos 14 DAE, os valores variaram de ~19% (centeio, mix de espécies e tremoço) a ~45% (nabo e azevém) na dose 1x e alcançaram ~70% (centeio e tremoço) na dose 2x. Na maior dose (2x), observou-se fitotoxicidade elevada em todos os tratamentos, alcançando valores superiores a 71% no centeio, azevém e tremoço, aos 21 DAE (Tabela 6).

A fitotoxicidade associada ao sulfentrazone está relacionada ao seu mecanismo de ação como inibidor da PROTOX, resultando em peroxidação de lipídios e sintomas foliares como clorose e necrose de células fotossinteticamente ativas, uma vez que a enzima é responsável pela síntese da clorofila e do grupo heme (Rodrigues e Almeida, 2018). Esse padrão explica os sintomas severos observados no pepino, especialmente sob doses elevadas.

Apesar da alta fitotoxicidade do sulfentrazone, a aplicação da mistura diuron+sulfentrazone não intensificou de forma consistente os sintomas de injúria em relação ao herbicida isolado. Entretanto, em condições específicas, foram observados valores superiores aos registrados com sulfentrazone (2x), particularmente após o cultivo de ervilhaca e tremoço aos 14 DAE (72,5 e 93%, respectivamente) e, aos 21DAE, após ervilhaca (83,3%), trigo mourisco (71,7%), mix de espécies (73,3%) e tremoço (100%). Esses resultados sugerem que a interação entre moléculas pode modificar a dinâmica de dissipação no solo, dependendo da espécie de cobertura utilizada.

Estudos recentes indicam que as misturas de herbicidas podem alterar processos de degradação e dinâmica das comunidades microbianas do solo, modificando a persistência e o comportamento desses compostos no ambiente (Mei *et al.*, 2024). Assim, a interação entre diuron e sulfentrazone pode ter influenciado a disponibilidade residual no solo, com variações dependentes da cobertura vegetal antecedente.

No que se refere ao desempenho do pepino, maiores índices de AF foram observados após o cultivo prévio de trigo mourisco sob diuron (1x e 2x), além de nabo, trigo mourisco e mix de espécies com diuron (2x) (Tabela 7). A MS foi semelhante ao controle em tratamentos com centeio e trigo mourisco (diuron 1x), nabo (diuron 1x e 2x) e mix de espécies (diuron 2x),

indicando baixa persistência residual do diuron após determinadas espécies de cobertura. Esses resultados estão de acordo com a literatura, que demonstra que herbicidas inibidores do FSII, como o diuron, podem afetar o desenvolvimento de espécies subsequentes, dependendo da dose e das condições edáficas e ambientais (Magnucka *et al.*, 2014).

Para o sulfentrazone (1x), observou-se manutenção da AF e MS do pepino após o cultivo de aveia-preta, ervilhaca, centeio, mix de espécies e tremoço, indicando redução do impacto residual do herbicida em determinados sistemas de cobertura. Ferraço *et al.* (2019) relataram efeito semelhante, ao destacarem que a ausência de plantas de cobertura em solos tratados com sulfentrazone resulta em elevada fitotoxicidade em espécies bioindicadoras, enquanto que a presença de coberturas vegetais, como *Crotalaria juncea*, pode reduzir significativamente esses efeitos.

Para a mistura de diuron+sulfentrazone (1x), o cultivo prévio de nabo, trigo mourisco e do mix de espécies resultou em maiores valores de AF e MS no pepino (Tabela 7). Em contraste, a dose de 2x promoveu redução significativa de AF e MS independentemente da espécie de cobertura utilizada, evidenciando aumento do efeito residual em cenários de maior carga herbicida.

Conjuntamente, os resultados indicam que a eficiência das espécies de cobertura na mitigação de resíduos herbicidas depende da molécula, da dose aplicada e da interação planta–solo–microrganismos. Observa-se que sistemas de fitorremediação, com espécies como aveia-preta, nabo, azevém, mix e tremoço destacam-se por sua capacidade de reduzir a fitotoxicidade de herbicidas residuais, mantendo crescimento e atividade fisiológica sob estresse químico. Além disso, evidências recentes indicam que consórcios de gramíneas e leguminosas podem favorecer a degradação de múltiplos herbicidas simultaneamente, por meio da maior diversidade de exsudatos radiculares e estímulo à microbiota do solo, o que é particularmente relevante em sistemas agrícolas com uso combinado de moléculas (Teófilo *et al.*, 2020; Amorim *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2025).

Nesse contexto, os resultados obtidos sustentam a importância do uso de espécies de cobertura como uma ferramenta complementar no manejo de resíduos de herbicidas presentes no solo, contribuindo para a mitigação do risco de *carryover*. Além disso, o cultivo dessas plantas favorece a sustentabilidade dos sistemas produtivos e contribui com a conservação da qualidade do solo, favorecendo os processos biológicos. Pesquisas futuras podem avançar na compreensão sobre a dinâmica dos herbicidas envolvidos na interação com o solo e as plantas, analisando os mecanismos envolvidos na persistência e dissipação desses compostos, além de

avaliar o desempenho das diferentes espécies em condições de campo, sob distintos tipos de solo e condições ambientais, aproximando-se de um resultado mais aplicável aos diferentes sistemas agrícolas.

CONCLUSÕES

As espécies de cobertura apresentaram diferentes capacidades de tolerar e fitorremediar os herbicidas avaliados. Aveia-preta, azevém, tremoço e o mix de espécies destacaram-se pelo maior potencial fitorremediador.

O diuron apresentou menor persistência residual, enquanto o sulfentrazone foi o herbicida mais tóxico.

O uso de espécies de cobertura constitui estratégia promissora para reduzir os efeitos residuais de herbicidas e aumentar a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, à FAPERGS e à CAPES pelo auxílio financeiro à pesquisa e pelas concessões de bolsas.

REFERÊNCIAS

- AGROFIT/MAPA. **Sistemas de Agrotóxicos Fitossanitários** - Consulta Aberta, 2026. Disponível em: www.agrofit.agricultura.gov.br/agrofit.
- ALBRECHT, L. P.; ALBRECHT, A. J. P.; NOVAKOSKI, F. P.; SILVA, A. F. M. Growth and agronomic performance of soybean applied with preemergence herbicides. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, v.76, n.3, p.10485-10492, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15446/rfnam.v76n3.104823>
- ALISTE, M.; ROS, C.; GARRIDO, I.; MARTÍNEZ, C. M.; VERA, A.; SILES, J.; CONTRERAS, F.; FLORES, P.; HELLÍN, P.; FENOLL, J.; BASTIDA, F. Green manure from cover crops enhances pesticide degradation and soil biological health. **Journal of Hazardous Materials**, v.495, p. 138984, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138984>
- ALVES, C.; GALON, L.; KAIZER, R. R.; HOLZ, C. M.; WINTER, F. L.; BASSO, F. J. M.; PERIN, G. F.; FORTE, C. T. Selection of species with soil phytoremediation potential after the application of protox-inhibiting herbicides. **Planta Daninha**, v.36, e018174765, 2018a. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582018360100074>
- ALVES, C.; GALON, L.; KAIZER, R. R.; WINTER, F. L.; HOLZ, C. M.; NONEMACHER, F.; SANTIN, C. O. Tolerance of annual winter species to protoporphyrinogen oxidase inhibiting herbicides (PROTOX). **Planta Daninha**, v. 36, e. 018174765, 2018b. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582018360100089>
- AMORIM, E. A. de.; FIRMANI, J. F.; GASQUE, G. H.; CHIANG, A.; DALAZEN, G. Sensitivity of soybean cultivars to the mixture of sulfentrazone + diuron applied in pre-emergence. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 12, n. 3, 2025. DOI: <https://doi.org/10.32404/rean.v12i3.9239>
- ARSHAD, M. A.; ABBAS, R. N.; BALOCH, R.; AHMAD, A.; ZULFIQAR, U.; EL-BELTAGI, H. S.; ALOMRAN, M. M.; VARA PRASAD, P. V. Assessing herbicide efficacy and selectivity for weed management and enhancing the production of non-GMO soybean cultivation. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v.71, n.1, p.1–23, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2025.2554157>
- BARKER, A. L.; PAWLAK, J.; DUKE, S. O.; BEFFA, R.; TRANEL, P. J.; WUERFFEL, J.; YOUNG, B.; PORRI, A.; LIEBL, R.; APONTE, R.; FINDLEY, D.; BETZ, M.; LERCHL, J.; CULPEPPER, S.; BRADLEY, K.; DAYAN, F. E. Discovery, mode of action, resistance mechanisms, and plan of action for sustainable use of Group 14 herbicides. **Weed Science**, v.71, n.3, p.173–188, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1017/wsc.2023.15>
- BARROSO, G. M.; SANTOS, E. A.; PIRES, F. R.; GALON, L.; CABRAL, C. M.; SANTOS, J. B. Phytoremediation: A green and low-cost technology to remediate herbicides in the environment. **Chemosphere**, v.334, p.138943, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138943>
- BATTAGLINO, B.; GRINZATO, A.; PAGLIANO, C. Binding properties of photosynthetic herbicides with the qb site of the d1 protein in plant photosystem ii: A combined functional and molecular docking study. **Plants**, v.10, n.8, p.1501. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10081501>
- CAMACHO, M. E.; GANNON, T. W.; AHMED, K. A.; MULVANEY, M. J.; HEITMAN, J. L.; AMOOZEGAR, A.; LEON, R.G. Evaluation of imazapic and flumioxazin carryover risk

- for Carinata (*Brassica carinata*) establishment. **Weed Science**, v. 70, n. 4, p. 503-513, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1017/wsc.2022.27>
- CHENG, X.; DAI, T.; HU, Z.; CUI, T.; WANG, W.; HAN, P.; HU, M.; HAO, J.; LIU, P.; LIU, X. Cytochrome P450 and Glutathione S-Transferase Confer Metabolic Resistance to SYP-14288 and Multi-Drug Resistance in *Rhizoctonia solani*. **Frontiers in microbiology**, v.13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.806339>
- DAMIM, V.; CARRIJO, B. S.; COSTA, N. A. Residual activity of sulfentrazone and its impacts on microbial activity and biomass of Brazilian Savanna soils. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 51, e68340, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632021v5168340>
- DAYAN, F. E.; BARKER, A.; DAYAN, L. C.; RAVET, K. The Role of antioxidants in the protection of plants against inhibitors of protoporphyrinogen oxidase. **Reactive Oxygen Species**, v. 7, n. 19, p. 55–63, 2019. DOI: <https://doi.org/10.20455/ros.2019.811>
- DILLIOTT, M.; SOLTANI, N.; HOOKER, D. C.; ROBINSON, D. E.; SIKKEMA, P. H. The addition of very low rates of protoporphyrinogen oxidase-inhibiting herbicides to glufosinate does not improve control of glyphosate-resistant horseweed (*Erigeron canadensis*). **Weed Technology**, v. 36, n.3, p. 358-367, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1017/wet.2022.19>
- DUKE, S. O.; LYDON, J.; BECERRIL, J. M.; SHERMAN, D.; LEHNEN, L. P. Jr.; MATSUMOTO, H. Protoporphyrinogen Oxidase-Inhibiting Herbicides. **Weed Science**, v.39, n.3, p.465–473, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0043174500073239>
- FERRAÇO, M.; BELO, A. F.; PIRES, F. R.; BONOMO, R.; FILHO, A. C. Phytoremediation of contaminated soil with sulfentrazone by different density of *Crotalaria juncea*. **Planta Daninha**, v. 37, p. e019185323, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582019370100008>
- FERREIRA, A. de S.; SILVA, J. F. da.; BRITO, W. B. M.; LIMA, A. F. L. Sorção de diuron e sulfentrazone em diferentes substratos. **Scientia Plena**, v.20, n.12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2024.120202>
- FITTON, N.; ALEXANDER, P.; ARNELL N.; BAJZELJ, B.; CALVIN, K.; DOELMAN, J.; GERBER, J.S.; HAVLIK, P.; HASEGAWA, T.; HERRERO, M.; KRISZTIN, T.; VAN MEIJL, H.; POWELL, T.; SANDS, R.; STEHFEST, E.; WEST P.C.; SMITH, P. The vulnerabilities of agricultural land and food production to future water scarcity. **Global Environmental Change**, v.58, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101944>
- FRANKLIN, W. L.; ZACHARIAS, T.; PIERRO, P. H. C.; OLIVEIRA, G. M. P.; BOVO, R. F.; ZARELLI, L. G.; DALAZEN, G. Weed control and soybean agronomic performance in response to application of sulfentrazone + diuron in pre-emergence. **Colloquium Agrariae**, v.17, p.70-80, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5747/ca.2021.v17.n3.a441>
- GAINES, T. A.; DUKE, S. O.; MORRAN, S.; RIGON, C. A. G.; TRANEL, P. J.; KÜPPER, A.; DAYAN, F. E. Mechanisms of evolved herbicide resistance. **The Journal of biological chemistry**, v.295, n.30, p.10307–10330, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1074/jbc.REV120.013572>
- GALON, L.; CAVALETTI, D. C.; SILVA, M. R.; SILVA, A. F.; HENZ, O. D. N. Seletividade e eficácia de herbicidas aplicados em soja para o controle de plantas daninhas. **Agrarian**, v.15, n.55, p.e15715-e15715, 2022. DOI: <https://doi.org/10.30612/agrarian.v15i55.15715>

GEHRKE, V. R.; CAMARGO, E. R.; AVILA, L. A. Sulfentrazone: Environmental Dynamics and Selectivity. **Planta Daninha**, v. 38, p. e020215663, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582020380100032>

GHAZI, R. M.; YUSOFF, N. R. N.; HALIM, N. S. A, WAHAB, I. R. A.; AB LATIF, N., HASMONI, S. H.; ZAKARIA, Z. A. Health effects of herbicides and its current removal strategies. **Bioengineered**, v. 14, n.1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/21655979.2023.2259526>

GOLDBERG-CAVALLERI, A.; FRANCO-ORTEGA, S.; BROWN, S.; WALKER, A.; ROUGEMONT, B.; SINCLAIR, J.; BRAZIER-HICKS, M.; DALE, R.; ONKOKESUNG, N.; EDWARDS, R. Functional characterization of cytochromes p450 linked to herbicide detoxification and selectivity in winter wheat and the problem competing weed blackgrass. **ACS Omega**, v.10, n.12, p.12270–12287, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c11069>

GONÇALVES, F. A. R.; MELO, C.; QUEIROZ, P. C.; ENDO, R. T. Atividade residual de herbicidas nas culturas do milho e da soja. **Revista de Ciências Agrárias**, v.61, e.2570, p.1-6, 2018. DOI: <https://doi.org/10.22491/rca.2018.2570>

KHATRI, P.; KUMAR, P.; SHAKYA, K.S.; KIRLAS, M. C.; KANT, K.. Understanding the intertwined nature of rising multiple risks in modern agriculture and food system. **Environment, Development and Sustainability**, v.26, p.24107–24150, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03638-7>

LI, J.; QIN, Z.; WANG, L.; XIN, M. Advances in the metabolism and phytoremediation of pesticides in horticultural plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 302, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118634>

LIU, Q.; JING, W.; YANG, W.; HUANG, M.; LU, P.; HU, D. Green manure (*Raphanus sativus* L.) alters soil microbial structure and promotes acetochlor degradation. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 17, n.12, p. 106017, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.106017>.

LU, H.; YU, Q.; HAN, H.; OWEN, M. J.; POWLES, S. B. A novel *psbA* mutation (Phe274–Val) confers resistance to PSII herbicides in wild radish (*Raphanus raphanistrum*). **Pest Management Science**, v. 75, n. 1, p. 144-151, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.5079>

MACEDO, G. de C.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D.; GOMES, G. L. G. C.; MATOS, A. K. A. de.; CASTRO, E. B. de. BURGOS, N. R. Behavior of sulfentrazone in the soil as influenced by cover crop before no-till soybean planting. **Weed Science**, v. 68, n. 6, p. 673-680, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1017/wsc.2020.70>

MAGNUCKA, E. G.; PIETR, S. J.; KOZUBEK, A. ZARNOWSKI, R. Various effects of the photosystem II – inhibiting herbicides on 5-n-alkylresorcinol accumulation in rye seedlings. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.116, n.1, p.56-62, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2014.09.015>

MEI, L.; XIA, X.; CAO, J.; ZHAO, Y.; HUANG, H.; LI, Y.; ZHANG, Z. Degradation of three herbicides and effect on bacterial communities under combined pollution. **Toxics**, v.12, n.8, p.562, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics12080562>

MENDES, F.; SOUZA, R. N. de.; COSTA, A. L. da.; GODOI JUNIOR, M. A. **Understanding the environmental behavior of herbicides: a systematic review of**

practical insights. In: Pesticides - Agronomic Application and Environmental Impact. IntechOpen, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002280>

MUNHOZ-GARCIA, G. V.; TAKESHITA, V.; PINÁCIO, C. de W.; CARDOSO, B. C.; VECCHIA, B. D.; NALIN, D.; OLIVEIRA, A. L. C. de.; FELIX, L. F.; TORNISIELO, V. L. Radiometric approaches with carbon-14-labeled molecules for determining herbicide fate in plant systems. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 284, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117003>

NANDULA, V. K.; RIECHERS, D. E.; FERHATOGLU, Y.; BARRETT, M.; DUKE, S. O.; DAYAN, F. E.; CAVALLERI, A. G.; JONES, C. T.; WORTLEY, D. J.; ONKOKESUNG, N.; HICKS, M. B.; EDWARDS, R.; GAINES, T.; IWAKAMI, S.; JUGULAM, M.; MA, R. Herbicide metabolism: crop selectivity, bioactivation, weed resistance, and regulation. **Weed Science**, v.67, n.2, p.149–175, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1017/wsc.2018.88>

NATH, C.P.; SINGH, R.G.; CHOUDHARY, V.K.; DATTA, D.; NANDAN, R.; SINGH, S.S. Challenges and alternatives of herbicide-based weed management. **Agronomy**, v.14, p.126, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14010126>

PRETTY, J. Intensification for redesigned and sustainable agricultural systems. **Science**, v. 362, n.6417, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aav0294>

PROCÓPIO, S. d. O.; BARIZON, R. R. M.; PAZIANOTTO, R. A. A.; MORANDI, M. A. B.; BRAZ, G. B. P. Impacts of Weed Resistance to Glyphosate on Herbicide Commercialization in Brazil. **Agriculture**, v. 14, n.12, p.2315. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14122315>

PYONE, W. W.; BELL, R. W.; ROSE, M. T.; MCGRATH, G. Phytotoxicity risk assessment of diuron residues in sands on wheat, chickpea, and canola. **PloS one**, v.19, n.12, p.e0306865, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306865>

RIGON, C. A. G.; KÜPPER, A.; SPARKS, C.; MONTGOMERY, J.; PETER, F.; SCHEPP, S.; JONES, A. P.; TRANEL, P. J.; BEFFA, R.; DAYAN, F. E.; GAINES, T. A. Function of cytochrome P450 CYP72A1182 in metabolic herbicide resistance evolution in *Amaranthus palmeri* populations. **Journal of Experimental Botany**, v. 76, n.10, p. 2891–2907, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eraf114>

ROCHA, P. R. R.; FARIA, A. T.; DA SILVA, G. S.; DE QUEIROZ, M. E. L. R.; GUIMARÃES, F. C. N. TIRONI, S. P.; GALON, L.; DA SILVA, A. A. Meia-vida do diuron em solos com diferentes atributos físicos e químicos. **Ciência Rural**, v. 43, n. 11, p. 1961-1966, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013001100007>

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. de. **Guia de herbicidas**. 7. ed. Londrina-PR: Midiograf, 2018.

SHAHID, M.; SINGH, U.B.; KHAN, M.S. Metabolomics-based mechanistic insights into revealing the adverse effects of pesticides on plants: An Interactive Review. **Metabolites**, v.13, p.246, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/metabo13020246>

SHARMA, A.; KUMAR, V.; SHAHZAD, B.; RAMAKRISHNAN, M.; SIDHU, G. P. S.; BALI, A. S. et al. Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: a review. **Journal of Plant Growth Regulation**, v.39, p.509–531, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00344-019-10018-x>

SHARMA, P.; REITZ, T.; SINGH, S. P.; WOEEICH, A.; MUEHE, E. M. Going beyond improving soil health: cover plants as contaminant removers in agriculture. **Trends in Plant Science**, v. 30, n.5, p. 539-552, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2025.01.009>.

SILVA, R.O.; BOTEON, B. F.; GUIDETTE, L. G. C.; SCHEDENFFELDT, B. F.; HIRATA, A. C. S.; MONQUERO, P. A. Potential of green manure in the phytoremediation of the herbicide indaziflam after different times of application. **Australian Journal of Crop Science**, v. 17, n.8, p.645–652, 2023. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.23.17.08.p3920>

SINDIVEG. Sindicato Nacional da Indústria de Produtos para Defesa Vegetal. Mercado total de defensivos agrícolas por produto aplicado, 2025. Disponível em: <https://sindiveg.org.br/>.

SOCIEDADE BRASILEIRA DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS - SBCPD. **Procedimentos para instalação, avaliação e análise de experimentos com herbicidas**. Londrina: SBCPD, 1995. 42 p.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO - SBCS. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre-RS: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016. 376 p.

SOUSA, B. T.; DOMINGUES, A. R.; BALOTTA, G. A. P.; ANDRADE, D.F.M.; DALAZEN, G. Controle de plantas daninhas e seletividade de sulfentrazone + diuron em cana-de-açúcar (cultivar RB 966928). **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.18, n.4, p.1-8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.7824/rbh.v18i4.691>

SOUTO, K. M.; JACQUES, R. J. S.; ZANELLA, R.; MACHADO, S. L. O.; BALBINOT, A.; AVILA, L. A. Phytostimulation of lowland soil contaminated with imidazolinone herbicides. **International Journal of Phytoremediation**, v. 22, n. 7, p. 774-780, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1710814>

SOUZA, A. J. de.; SANTOS, E.; RIBEIRO, F. P.; PEREIRA, A. P. de A.; VIANA, D. G.; COELHO, I. da S.; EGREAJA FILHO, F. B.; SANTAREN, K. C. F. *Crotalaria juncea* L. enhances the bioremediation of sulfentrazone-contaminated soil and promotes changes in the soil bacterial community. **Brazilian Journal of Microbiology**, v.54, n. 3, p. 2319-2331, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42770-023-01064-5>

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; NASCIMENTO, P. C.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 3.ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2018. 252 p.

TAKESHITA, V.; MENDES, K. F.; ALONSO, F. G.; TORNISIELO, V. L. Effect of Organic Matter on the Behavior and Control Effectiveness of Herbicides in Soil. **Planta Daninha**, v. 37, p. e019214401, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582019370100110>

TANDON, S.; PANT, R. Kinetics of diuron under aerobic condition and residue analysis in sugarcane under subtropical field conditions. **Environmental Technology**, v. 40, n. 1, p. 86-93, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1380709>

TEÓFILO, T. M. S.; MENDES, K. F.; FERNANDES, B. C. C.; OLIVEIRA, F. S. de.; SILVA, T. S.; TAKESHITA, V.; SOUZA, M. de F.; TORNISIELO, V. L.; SILVA, D. V. Phytoextraction of diuron, hexazinone, and sulfometuron-methyl from the soil by green manure species. **Chemosphere**, v.256, e.127059, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127059>

THAPA, V. R.; GHIMIRE, R.; MARTINEZ, V. A.; MARSALIS, M. A.; SCHIPANSKI, M. E. Cover crop biomass and species composition affect soil microbial community structure and enzyme activities in semiarid cropping systems. **Applied Soil Ecology**, v. 157, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103735>

TORRES, L. G.; FERREIRA, E. A.; ROCHA, P. R. R.; FARIA, A. T.; GONÇALVES, V. A.; GALON, L.; SILVA, A. F.; SILVA, A. A. Alterações nas características fisiológicas de cultivares de cana-de-açúcar submetida à aplicação de herbicidas. **Planta Daninha**, v. 30, n. 3, p. 581-587, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582012000300014>

VASCONCELOS, S. M. A.; JAKELAITIS, A.; COSTA, M. L. M.; OLIVEIRA, R. R. C.; SANTOS, V. S. Seleção de espécies tolerantes para a fitorremediação de solo contaminado com imazapic. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 19, n. 2, p. 149-158, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5965/223811711922020149>

WANG, X. Managing land carrying capacity: key to achieving sustainable production systems for food security. **Land**, v.11, n.484, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11040484>

WITTMANN, D.T.; PETER, F.E.; STRÄTKER, S.M.; ORTEGA-RODÉS P.; GRIMM, B.; HEDTKE, B. Dual plastid targeting of protoporphyrinogen oxidase 2 in Amaranthaceae promotes herbicide tolerance. **Plant Physiology**, v.195, n.1, p.713-727, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/plphys/kiae062>

YANNICCARI, M.; GIGÓN, R.; LARSEN, A. Cytochrome p450 herbicide metabolism as the main mechanism of cross-resistance to ACCase- and ALS-Inhibitors in *Lolium* spp. populations from Argentina: a molecular approach in characterization and detection. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.600301>

Tabela 1. Fitotoxicidade aos 28 dias após a aplicação dos herbicidas (DAE) às espécies com potencial de fitorremediar o solo submetidas à aplicação de doses de diuron (0,0; 1x - 490 e 2x - 980 g ha⁻¹), sulfentrazone (0,0; 1x - 245; 2x - 490 g ha⁻¹) e diuron + sulfentrazone (00; 1x - 490+245; 2x - 980+490 g ha⁻¹) usados em pré-emergência.

Coberturas	Herbicidas								
	Diuron			Sulfentrazone			Diuron + Sulfentrazone		
	0	1x	2x	0	1x	2x	0	1x	2x
	Fitotoxicidade aos 28 dias (%)								
Aveia preta	a0,0aC	c12,8dB	b30,0dA	a0,0aC	b31,8cB	a56,8cA	a0,0aB	a50,0cA	a51,8cA
Ervilhaca	a0,0aB	a100,0aA	a100,0aA	a0,0aB	b52,8bA	b45,0cdA	a0,0aB	c41,8cdA	b45,0cdA
Centeio	a0,0aC	b10,0dB	a100,0aA	a0,0aC	b13,8dB	c38,3dA	a0,0aB	a51,8bcA	b51,8cA
Nabo	a0,0aC	c30,0cB	a100,0aA	a0,0aC	b43,3bcB	c55,0cA	a0,0aC	a63,3bB	b80,0bA
Mourisco	a0,0aB	c69,0bA	b67,8bA	a0,0aB	a100,0aA	a100,0aA	a0,0aC	b90,0aB	a100,0aA
Azevém	a0,0aB	ab40,8cA	b43,3cA	a0,0aC	a46,3bB	a77,8bA	a0,0aB	b36,8deA	b42,3cdA
Mix	a0,0aC	a32,8cA	b13,3eB	a0,0aB	a33,0cA	a41,8dA	a0,0aC	a25,5efB	a38,3dA
Tremoço	a0,0aC	a71,8bB	a100,0aA	a0,0aC	b13,0dB	b37,8dA	a0,0aC	b20,0fB	a100,0aA
Média Geral	36,04								
C.V. (%)	15,12								

Letra antecedendo a média compara as doses para cada herbicida e cobertura. Média seguida de letra minúscula (posterior ao número) compara as coberturas entre si na coluna para cada dose de herbicida. Média seguida por letra maiúscula na linha compara os herbicidas entre si para cada cobertura e dose. Todas as comparações foram efetuadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$).

Tabela 2. Massa seca das espécies fitorremediadoras cultivada por 30 dias, submetidas à aplicação de doses de diuron (0.0; 1x - 490 e 2x - 980 g ha⁻¹), sulfentrazone (0.0; 1x - 245; 2x - 490 g ha⁻¹) e diuron + sulfentrazone (0.0; 1x - 490+245; 2x - 980+490 g ha⁻¹) aplicados em pré-emergência.

Coberturas	Herbicidas								
	Diuron			Sulfentrazone			Diuron + Sulfentrazone		
	0	1x	2x	0	1x	2x	0	1x	2x
Área foliar (cm ² vaso ⁻¹)									
Aveia preta	a6648,3fA	b2665,5dB	a2824,9bB	a6648,3fA	a5930,5efA	a2761,1fB	a6648,3fA	b3642,0eB	a3633,8cB
Ervilhaca	a7614,2efA	c0,0eB	c0,0cB	a7614,2efB	b4417,2fC	a8984,3dA	a7614,2efA	a7488,6cA	b4564,4bcB
Centeio	a8272,5defA	c 4112,5dB	c0,0cC	a8272,5defA	a7026,1eAB	a6279,6eB	a8272,5defA	b 5556,4dB	b3296,9cC
Nabo	a34505,1bA	c23167,1aB	c0,0cC	a34505,1bA	b27808,8bB	a11664,5cC	a34505,1bA	a31613,8aB	b5512,4bC
Mourisco	a38882,0aA	a8355,0cB	a36889,7bC	a38882,0aA	c0,0gB	b0,0gB	a38882,0aA	b2968,9eB	b0,0dC
Azevém	a8690,9deA	b4205,6dB	a3411,4bB	a8690,9deA	a9007,2dA	a3517,6fB	a8690,9deA	b3406,5eC	a4735,0bcB
Mix	a26027,8cA	b16331,3bB	b15434,0aB	a26027,8cB	a32273,9aA	a16948,5bC	a26027,8cA	c9536,21bB	c7881,1aC
Tremoço	a 9592,5dA	c738,8efB	b0,0cB	a9592,5dC	a19592,4cB	a21319,7aA	a9592,5dA	b2612,9eB	b0,0dC
Média Geral	10828,00								
C.V. (%)	7,33								
Massa seca (g vaso ⁻¹)									
Aveia preta	a4,7eA	a 1,1deB	a1,0bB	a4,7eA	a2,3dB	a0,5eC	a4,7eA	a1,5dB	a1,8bcB
Ervilhaca	a6,5deA	b0,0eA	b0,0bA	a6,5deA	a2,5dC	a4,5cB	a6,5deA	a3,8cB	a4,8aB
Centeio	a8,2dA	c1,6cdeB	b0,0bC	a8,2dB	a12,2cA	a2,4dC	a8,2dA	b3,8cB	a2,7bB
Nabo	a29,6aA	c17,1aB	b0,0bC	a29,6aB	a46,2aA	a9,9aC	a29,6aA	b28,3aA	b1,0bcB
Mourisco	a21,4cA	a2,8cdB	a0,7bC	a21,4cA	b0,0eB	a0,0eB	a21,4cA	b0,5dB	a0,0cB
Azevém	a5,7eA	a2,7cdB	a0,6bC	a5,5eA	a2,9dB	ab1,3deC	a5,5eA	a1,5dB	a2,4bB
Mix	a27,4bA	b13,6bC	a20,3aB	a27,4bA	a21,1bB	b7,4bC	a27,4bA	c8,3bB	b6,6aC
Tremoço	a2,8fA	ab3,0cA	b0,0bB	a2,8fB	a3,8dB	a6,2bcA	a2,8fA	b2,3cdA	b0,0cB
Média Geral	7,99								
C.V. (%)	10,58								

Letra antecedendo a média compara as doses para cada herbicida e cobertura. Média seguida de letra minúscula (posterior ao número) compara as coberturas entre si na coluna para cada dose de herbicida. Média seguida por letra maiúscula na linha compara os herbicidas entre si para cada cobertura e dose. Todas as comparações foram efetuadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$).

Tabela 3. Taxa fotossintética e condutância estomática das espécies fitorremediadoras cultivada por 30 dias, submetidas à aplicação de doses de diuron (0.0; 1x - 490 e 2x - 980 g ha⁻¹), sulfentrazone (0.0; 1x - 245; 2x - 490 g ha⁻¹) e diuron + sulfentrazone (0.0; 1x - 490+245; 2x - 980+490 g ha⁻¹) aplicados em pré-emergência.

Coberturas	Herbicidas								
	Diuron			Sulfentrazone			Diuron + Sulfentrazone		
	0	1x	2x	0	1x	2x	0	1x	2x
Taxa fotossintética (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)									
Aveia preta	a11,4dA	a9,6bB	a10,4bAB	a11,4dA	b7,1dB	b6,6deB	a11,4dA	a9,8cB	b7,4dC
Ervilhaca	a8,2eA	c0,0fB	c0,0dB	a8,2eB	a7,8cdB	a11,1bA	a8,2eA	b6,5dB	b9,3cA
Centeio	a11,7dA	c5,0dB	c0,0dC	a11,7dB	a13,6bA	b7,2cdC	a11,7dA	b11,6bA	a9,2cB
Nabo	a19,8aA	b15,9aB	c0,0dC	a19,8aB	a25,1aA	b15,8aC	a19,8aB	c10,2bcC	a22,3aA
Mourisco	a15,7bB	a4,4dC	a19,2aA	a15,7bA	b0,0fB	b0,0fB	a15,7bA	b0,0eB	b0,0eB
Azevém	a9,7eA	c6,9cB	c3,4cC	a9,7eA	b8,9cAB	b8,5cB	a9,7eA	a10,7bcA	a10,3cA
Mix	a9,0eA	b3,9dB	b4,5cB	a9,0eA	b4,9cAB	b5,4eB	a9,0eB	a10,0cB	a14,7bA
Tremoço	a13,9cA	c1,7eB	b0,0dC	a13,9cA	b12,5bB	a10,6bC	a13,9cA	a13,8aA	b0,0eB
Média Geral	9,36								
C.V. (%)	7,58								
Condutância estomática (g_s , $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)									
Aveia preta	a0,25bA	b0,09cdC	b0,15bB	a0,25bA	b0,10dB	b0,11cdB	a0,25bC	a0,38bcA	a0,32dB
Ervilhaca	a0,26bA	c0,00eB	c0,00cB	a0,26bA	b0,15cdB	b0,18cB	a0,26bdeC	a0,40bB	a1,11aA
Centeio	a0,22bcA	c0,09cdB	c0,00cC	a0,22bcA	b0,18cA	b0,10dB	a0,22bcB	a0,37bcA	a0,35cdA
Nabo	a0,40aB	a0,55aA	c0,00cC	a0,40aAB	b0,44aA	b0,38aB	a0,40aB	c0,38bcB	a0,52bA
Mourisco	a0,38aB	a0,40bAB	a0,45aA	a0,38aA	b0,00eB	b0,00eB	a0,38aA	b0,00dB	b0,00eB
Azevém	a0,18cA	b0,10cdB	b0,06cB	a0,18cA	b0,11dB	b0,09dB	a0,18cB	a0,32cA	a0,33dA
Mix	a0,17cA	c0,04deB	b0,19bA	a0,17cA	b0,11dB	c0,10dB	a0,17cC	a0,32cB	a0,41cA
Tremoço	a0,39aA	c0,14cB	b0,00cC	a0,39aA	b0,32bB	a0,28bB	a0,39aB	a0,57aA	b0,00eC
Média Geral	0,24								
C.V. (%)	13,23								

Letra antecedendo a média compara as doses para cada herbicida e cobertura. Média seguida de letra minúscula (posterior ao número) compara as coberturas entre si na coluna para cada dose de herbicida. Média seguida por letra maiúscula na linha compara os herbicidas entre si para cada cobertura e dose. Todas as comparações foram efetuadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$).

Tabela 4. Taxa de transpiração e concentração interna de CO₂ das espécies fitorremediadoras cultivada por 30 dias submetidas à aplicação de doses de diuron (0.0; 1x - 490 e 2x - 980 g ha⁻¹), sulfentrazone (0.0; 1x - 245; 2x - 490 g ha⁻¹) e diuron + sulfentrazone (0.0; 1x - 490+245; 2x - 980+490 g ha⁻¹) aplicados em pré-emergência.

Coberturas	Diuron			Sulfentrazone			Diuron + Sulfentrazone		
	0	1x	2x	0	1x	2x	0	1x	2x
Taxa de transpiração (<i>E</i> , mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)									
Aveia preta	a3,2cdA	c1,9cC	b2,6cB	a3,2cdB	a4,0cA	a4,4bA	a3,2cdA	b2,6cB	b2,5dB
Ervilhaca	a3,2cdA	b0,0dB	b0,0dB	a3,2cdB	a2,9dB	a3,9bA	a3,2cdAB	a2,8cB	a3,5bcA
Centeio	a3,9bA	c1,9cB	c0,0dC	a3,9bB	a6,1aA	a4,2bB	a3,9bA	b3,0bcB	b2,9dB
Nabo	a4,7aA	b4,5aA	c0,0dB	a4,7aC	a6,5aA	a5,2aB	a4,7aA	c3,7aB	b4,4aA
Mourisco	a4,6aB	a4,9aAB	a5,2aA	a4,6aA	b0,0eB	b0,0cB	a4,6aA	b0,0dB	b0,0eB
Azevém	a3,5bcA	b3,1bA	b2,6cB	a3,5bcB	a5,1bA	a5,0aA	a3,5bcA	b3,1abcA	b3,1cdA
Mix	a2,7dB	c1,9cC	b3,5bA	a2,7dB	a4,1cA	a4,1bA	a2,7dB	b3,5abA	ab3,8abA
Tremoço	a3,7bcA	b2,9bB	b0,0dC	a 3,7bcC	a5,3bA	a4,3bB	a3,7bcA	b2,9bcB	b0,0eC
Média Geral	3,20								
C.V. (%)	9,2								
Concentração interna de CO ₂ (Ci, µmol mol ⁻¹)									
Aveia preta	a271,8bcdB	b272,5cB	b291,8abA	a271,8bcdA	b258,3cA	c268,3cdA	a271,8bcdB	a373,0aA	a375,0aA
Ervilhaca	a331,8aA	c0,0eB	c0,0cB	a331,8aA	b334,5aA	b290,3bcB	a331,8aB	a357,8abA	a367,5aA
Centeio	a253,0dA	b252,0cdA	c0,0cB	a253,0dA	c224,0eB	b 240,8eAB	a253,0dC	a333,8cB	a359,8aA
Nabo	a282,5bcB	a326,0bA	c0,0cC	a282,5bcA	b250,3cdB	a295,5bA	a282,5bcB	a327,0cA	b267,0cB
Mourisco	a293,0bB	a393,5aA	a288,8abB	a293,0bA	b0,0fB	b0,0fB	a293,0bA	b0,0dB	b0,0dB
Azevém	a268,8cdA	b269,8cA	b270,0bA	a268,8cdA	c232,8deB	b260,3deA	a268,8cdB	a374,3aA	a369,0aA
Mix	a249,0dB	c233,5dB	b296,5aA	a249,0dB	b265,5cB	b290,0bcA	a249,0dcB	a347,3bcA	a334,3bA
Tremoço	a317,5aB	a390,0aA	b0,0cC	a317,5aA	c290,3bB	a319,8aA	a317,5aB	b341,0bcA	b0,0dC
Média Geral	256,01								
C.V. (%)	4,28								

Letra antecedendo a média compara as doses para cada herbicida e cobertura. Média seguida de letra minúscula (posterior ao número) compara as coberturas entre si na coluna para cada dose de herbicida. Média seguida por letra maiúscula na linha compara os herbicidas entre si para cada cobertura e dose. Todas as comparações foram efetuadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$).

Tabela 5. Eficiência do uso da água das espécies fitorremediadoras cultivada por 30 dias submetidas à aplicação de doses de diuron (0.0; 1x - 490 e 2x - 980 g ha⁻¹), sulfentrazone (0.0; 1x - 245; 2x - 490 g ha⁻¹) e diuron + sulfentrazone (0.0; 1x - 490+245; 2x - 980+490 g ha⁻¹) aplicados em pré-emergência.

Coberturas	Herbicidas								
	Diuron			Sulfentrazone			Diuron + Sulfentrazone		
	0	1x	2x	0	1x	2x	0	1x	2x
Eficiência do uso da água (EUA, mol CO ₂ mol H ₂ O ⁻¹)									
Aveia preta	a3,6bcC	a5,0aA	a4,2aB	a3,6bcA	c1,8cdB	c1,5cB	a3,6bcA	b3,7bA	b3,0cdB
Ervilhaca	a2,5eA	b0,0eB	b0,0cB	a2,5eA	a2,7bA	a2,8abA	a2,5eA	a2,3dA	a2,6dA
Centeio	a3,0cdeA	b2,6cA	c0,0cB	a3,0cdeA	b2,2bcdB	b1,7cC	a3,0cdeB	a3,9bA	a3,2cdB
Nabo	a4,2aA	a3,5bB	c0,0cC	a4,2aA	a3,8aA	b3,1aB	a4,2aB	b2,7dC	a5,1aA
Mourisco	a3,4bcA	a0,9dB	a3,7aA	a3,4bcA	b0,0fB	b0,0dB	a3,4bcA	b0,0eB	b0,0eB
Azevém	a2,8deA	b2,2cB	b1,3bC	a2,8deA	c1,8deB	b1,7cB	a2,8deB	a3,4bcA	a3,4bcA
Mix	a3,4bcdA	b2,0cB	b1,3bC	a3,4bcdA	c1,2eB	b1,3cB	a3,4bcdB	a2,9cdC	a3,9bA
Tremoço	a3,7abA	c0,6deB	b0,0cC	a3,7abA	b2,4bcB	a2,5bB	a3,7abB	a4,7aA	b0,0eC
Média Geral	2,50								
C.V. (%)	10,87								

Letra antecedendo a média compara as doses para cada herbicida e cobertura. Média seguida de letra minúscula (posterior ao número) compara as coberturas entre si na coluna para cada dose de herbicida. Média seguida por letra maiúscula na linha compara os herbicidas entre si para cada cobertura e dose. Todas as comparações foram efetuadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$).

Tabela 6. Fitotoxicidade das plantas de pepino, cultivadas em sucessão as espécies com potencial fitorremediador submetidas à aplicação de doses de diuron (0.0; 1x - 490 e 2x - 980 g ha⁻¹), sulfentrazone (0.0; 1x - 245; 2x - 490 g ha⁻¹) e diuron + (0.0; 1x - 490+245; 2x - 980+490 g ha⁻¹) aplicados em pré-emergência avaliada 7, 14 e 21 dias após a emergência (DAE).

Coberturas	Herbicidas								
	Diuron			Sulfentrazone			Diuron + Sulfentrazone		
	0	1x	2x	0	1x	2x	0	1x	2x
Fitotoxicidade aos 7 dias após emergência do pepino (%)									
Aveia preta	a0,0aA	c0,0aA	c0,0bA	a0,0aC	a17,7dB	a37,5bA	a0,0aC	b10,0eB	b28,3cdA
Ervilhaca	a0,0aA	c0,0aA	c0,0bA	a0,0aC	a28,3cB	a35,0bA	a0,0aC	b22,5bB	b31,7bcA
Centeio	a0,0aA	c0,0aA	c0,0bA	a0,0aC	b12,3efB	a42,5aA	a0,0aC	a27,5aB	b31,6bcA
Nabo	a0,0aB	c0,0aB	c6,0aA	a0,0aC	a36,7aB	a43,3aA	a0,0aC	b14,0dB	b27,5dA
Mourisco	a0,0aA	c0,0A	c0,0bA	a0,0aC	a31,7bcB	a45,0aA	a0,0aC	b12,3deB	b22,5eA
Azevém	a0,0aA	c0,0aA	c0,0A	a0,0aC	a35,0abB	a45,0aA	a0,0aC	b27,5aB	b37,5aA
Mix	a0,0aA	b0,0aA	c0,0bA	a0,0aC	a10,7fB	a37,5bA	a0,0aC	a11,0deB	b17,7fA
Tremoço	a0,0aA	c0,0aA	c0,0bA	a0,0aC	b11,0efB	a41,7aA	a0,0aC	a19,3bcB	b31,7bcA
Sem cultivo	a0,0aA	c0,0aA	c0,0bA	a0,0aC	b14,3eB	a42,5aA	a0,0aC	a19,0cB	b32,5bA
Média	12,31								
C.V. (%)	12,37								
Fitotoxicidade aos 14 dias após emergência do pepino (%)									
Aveia preta	a0,0aA	b0,0bA	b0,0cA	a0,0aC	a21,7eB	a61,7bA	a0,0aC	a25,0eB	a60,0cA
Ervilhaca	a0,0aB	c0,0bB	c11,0aA	a0,0aC	b38,3cB	b51,7cA	a0,0aC	a46,7aB	a72,5bA
Centeio	a0,0aB	c0,0bB	c10,0abA	a0,0aC	b18,3eB	a68,3aA	a0,0aC	a47,5aB	b53,3eA
Nabo	a0,0aB	c0,0bB	c10,5abA	a0,0aC	a43,3abB	a63,3bA	a0,0aC	b26,7deB	b55,0deA
Mourisco	a0,0aB	c0,0bB	c6,0bA	a0,0aC	a40,0bcB	a62,5bA	a0,0aC	b30,0dB	b58,3cdA
Azevém	a0,0aA	c0,0bA	b0,0cA	a0,0aC	a46,7aB	a62,5bA	a0,0aC	a45,0abB	a61,7cA
Mix	a0,0aA	c0,0bA	b0,0cA	a0,0aC	b19,3eB	a51,7cA	a0,0aC	a25,0eB	a53,3eA
Tremoço	a0,0aB	c0,0bB	c10,0abA	a0,0aC	b18,7eB	b70,0aA	a0,0aC	a41,7bcB	a93,3aA
Sem cultivo	a0,0aB	c6,0aA	c9,3abA	a0,0aC	b27,5dB	a63,3bA	a0,0aC	a40,0cB	b57,5cdeA
Média	22,02								
C.V. (%)	9,63								
Fitotoxicidade aos 21 dias após emergência do pepino (%)									
Aveia preta	a0,0aB	c0,0aB	c8,3aA	a0,0aC	b14,0eB	b66,7cA	a0,0aC	a33,3dB	a78,3cA
Ervilhaca	a0,0aB	c0,0aB	c7,7aA	a0,0aC	b25,0cdB	b52,5dA	a0,0aC	a45,0bB	a83,3bA
Centeio	a0,0aB	c0,0aB	b7,5aA	a0,0aC	b21,0dB	a75,0aA	a0,0aC	a51,7aB	a71,7deA
Nabo	a0,0aB	c0,0aB	b7,7aA	a0,0aC	a46,7aB	a68,3bcA	a0,0aC	b33,3dB	a68,3efA
Mourisco	a0,0aB	c0,0aB	c4,3abA	a0,0aC	a45,0aB	b66,7cA	a0,0aC	b40,0cB	a71,7deA
Azevém	a0,0aA	b0,0aA	c0,0bA	a0,0aC	a46,7aB	a71,7abA	a0,0aC	a50,0aB	b66,7fA
Mix	a0,0aA	c0,0aA	c0,0bA	a0,0aC	b23,3cdB	b56,7dA	a0,0aC	a33,3dB	a73,3dA
Tremoço	a0,0aB	c0,0aB	c5,3aA	a0,0aC	b27,5cB	b71,7abA	a0,0aC	a45,0bB	a100,0aA
Sem cultivo	a0,0aB	c3,7aA	c6,0aA	a0,0aC	b32,5bB	b 68,3bcA	a0,0aC	a45,0bB	a 73,3dA
Média	24,60								
C.V. (%)	8,16								

Letra antecedendo a média compara as doses para cada herbicida e cobertura. Média seguida de letra minúscula (posterior ao número) compara as coberturas entre si na coluna para cada dose de herbicida. Média seguida por letra maiúscula na linha compara os herbicidas entre si para cada cobertura e dose. Todas as comparações foram efetuadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$).

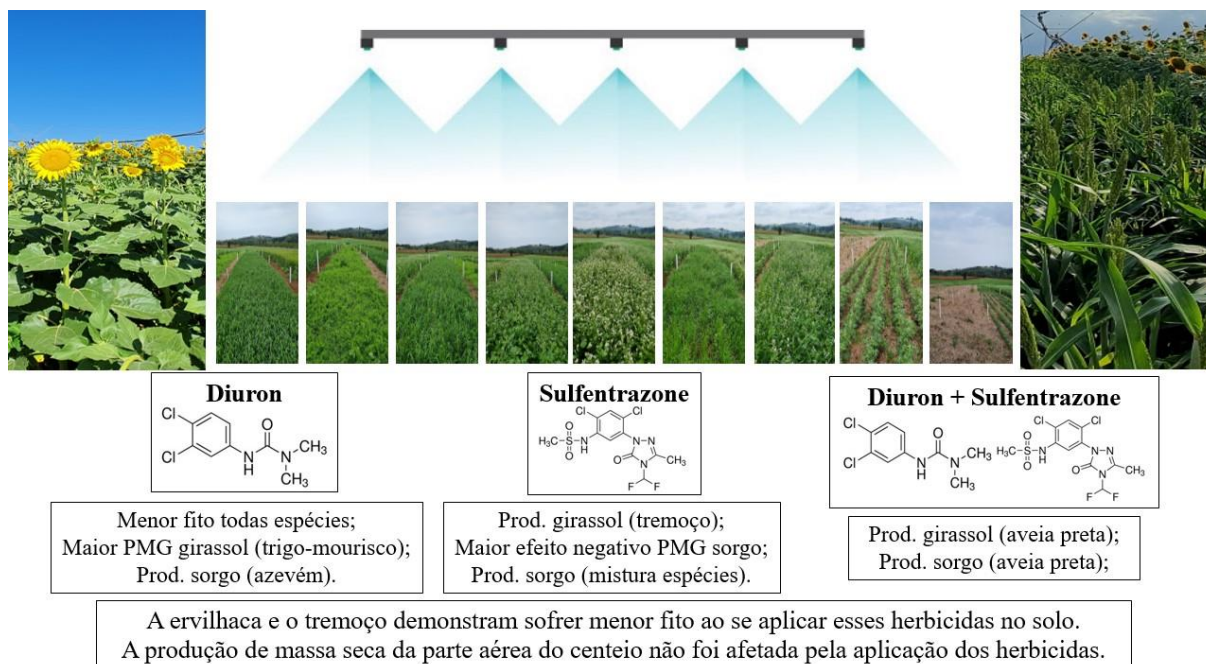
Tabela 7. Área foliar e massa seca das plantas de pepino cultivadas por 30 dias em sucessão as espécies com potencial fitorremediador após aplicação de doses de diuron (0.0; 1x - 490 e 2x - 980 g ha⁻¹), sulfentrazone (0.0; 1x - 245; 2x - 490 g ha⁻¹) e diuron + sulfentrazone (0.0; 1x - 490+245; 2x - 980+490 g ha⁻¹) aplicados em pré-emergência.

Cobertura	Herbicidas								
	Diuron			Sulfentrazone			diuron + sulfentrazone		
	0	1x	2x	0	1x	2x	0	1x	2x
Área foliar das plantas de pepino (cm ² vaso ⁻¹)									
Aveia preta	a1773,5aA	b1148,6cB	a966,6deB	a1773,5aA	a1726,5bA	b684,8cdB	a1773,5aA	b1232,5defB	ab834,8aC
Ervilhaca	a1773,5aA	b1338,6bcB	a1313,7bcB	a1773,5aA	a1813,4bA	b1061,1bB	a1773,5aA	b1136,2efB	c820,5aC
Centeio	a1773,5aA	b1475,9bB	a1204,5cdC	a1773,5aA	a1850,2bA	b774,0bcdB	a1773,5aA	b1502,8cdB	b691,7abC
Nabo	a1773,5aA	b1334,0bcB	a1819,6aA	a1773,5aA	c888,3dB	c476,8dC	a1773,5aA	a1933,5bA	b906,0aB
Mourisco	a1773,5aB	a2205,8aA	a1699,0aB	a1773,5aA	c1202,4cB	b779,6bcC	a1773,5aA	b1597,0cA	c505,1bB
Azevém	a1773,5aA	b1464,0bB	ab897,4eC	a1773,5aA	a1808,9bA	a1006,1bB	a1773,5aA	b1363,8cdefB	b673,6abC
Mix	a1773,5aA	b1109,2cB	a1593,6abA	a1773,5aB	a2374,0aA	a1541,6aC	a1773,5aB	a2409,0aA	b442,6bC
Tremoço	a1773,5aA	c739,6dC	b1005,1deB	a1773,5aAB	a1925,4bA	a1617,1aB	a1773,5aA	b1081,2fB	c0,0cC
Sem cultivo	a1773,5aA	b1560,4bA	a864,6eB	a1773,5aB	a2319,5aA	a1035,1bC	a1773,5aA	b1425,6cdeB	b481,7bC
Média	1427,39								
C.V. (%)	9,43								
Massa seca da parte aérea das plantas de pepino (g vaso ⁻¹)									
Aveia preta	a3,2aA	b1,3dB	a1,0cdB	a3,2aA	a3,8abA	a0,5aB	a3,2aA	b2,0cdB	a0,3aC
Ervilhaca	a3,2aA	b1,8cdB	a1,7abcB	a3,2aA	a2,9bcA	ab1,0aB	a3,2aA	b2,1cdB	b0,2aC
Centeio	a3,2aA	a2,7abcA	a1,4cdB	a3,2aA	a2,7cdA	b0,3aB	a3,2aA	b0,9eB	b0,3aB
Nabo	a3,2aA	a3,4abA	a2,7aA	a3,2aA	b1,8deB	b0,5aC	a3,2aA	a3,4abA	b0,6aB
Mourisco	a3,2aA	a2,5bcA	a1,7bcdB	a3,2aA	b1,6eB	b0,5aC	a3,2aA	a2,6bcA	b0,2aB
Azevém	a3,2aA	a1,4dB	a0,6dB	a3,2aA	a1,7deB	a0,3aC	a3,2aA	a1,7cdeB	a0,4aC
Mix	a3,2aA	b1,9cdB	a2,5abAB	a3,2aB	a4,4aA	b0,9aC	a3,2aA	a3,9aA	b0,3aB
Tremoço	a3,2aA	b1,1dB	a1,3cdB	a3,2aA	a3,8abA	b0,5aB	a3,2aA	b1,5deB	b0,0aC
Sem cultivo	a3,2aAB	a3,6aA	a2,7aB	a3,2aA	ab3,0bcA	b0,6aB	a3,2aA	b2,2cdB	b0,2aC
Média	2,16								
C.V. (%)	21,54								

Letra antecedendo a média compara as doses para cada herbicida e cobertura Média seguida de letra minúscula (posterior ao número) compara as coberturas entre si na coluna para cada dose de herbicida Média seguida por letra maiúscula na linha compara os herbicidas entre si para cada cobertura e dose Todas as comparações foram efetuadas pelo teste de Tukey ($p \leq 005$).

ARTIGO II – POTENCIAL DE ESPÉCIES DE COBERTURA DE INVERNO PARA A FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO TRATADO COM DIURON E SULFENTRAZONE EM CONDIÇÕES DE CAMPO

Resumo gráfico



RESUMO - O uso de plantas de cobertura para remediação de solos com resíduos de herbicidas tem recebido crescente atenção devido à sua facilidade e viabilidade econômica. A seleção de espécies tolerantes e potencialmente fitorremediadoras para um determinado grupo de moléculas é a primeira etapa para o sucesso dessa tecnologia verde. Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial de adubos verdes semeados no inverno para fitorremediação do solo tratado com os herbicidas, diuron, sulfentrazone, isoladamente e em combinação. No experimento de campo avaliou-se o efeito residual de diuron (490 g ha^{-1}), sulfentrazone (245 g ha^{-1}), e diuron + sulfentrazone ($490 + 245 \text{ g ha}^{-1}$) aplicados em pré-emergência das espécies; *Avena strigosa*, *Vicia sativa*, *Secale cereale*, *Raphanus sativus*, *Fagopyrum esculentum*, *Lolium multiflorum*, *Lupinus albus* e mais um tratamento com a mistura dessas espécies. Os resultados pós-fitorremediação indicaram que, aos 7 dias após a emergência (DAE), não houve fitotoxicidade nas espécies tratadas com diuron, com a menor incidência observada em *F. esculentum* aos 14 e 21 DAE. Tampouco houve fitotoxicidade a *V. sativa* pelo diuron aos 28 e 35 DAE. A aplicação dos herbicidas não causou danos em *L. albus* e *V. sativa* até os 7 DAE, sendo essas as

menos afetadas em comparação com as demais espécies. A massa seca da parte aérea variou conforme as espécies e herbicidas, com maiores acumulações nos tratamentos sem herbicidas, com mistura de espécies, e em *L. albus*. As taxas fotossintéticas de *H. annuus* foram positivamente influenciadas pela fitorremediação com *S. cereale* e *F. esculentum*. A condutância estomática não diferiu entre os tratamentos, exceto para *H. annuus* em áreas com *L. multiflorum*. A eficiência do uso da água foi maior com *S. cereale* e *F. esculentum*. O peso de mil grãos e a produtividade de *H. annuus* e *S. bicolor* foram influenciados pelas espécies fitorremediadoras e de acordo com os herbicidas aplicados. As espécies de cobertura apresentaram potencial fitorremediador distintos, influenciando as culturas em sucessão.

Palavras- chave: Mistura de herbicidas. Biorremediação. *Carryover*. Herbicidas residuais.

POTENTIAL OF WINTER COVER CROPS FOR PHYTOREMEDIATION OF SOIL TREATED WITH DIURON AND SULFENTRAZONE UNDER FIELD CONDITIONS

ABSTRACT - The use of cover crops for the decontamination of soils with herbicide residues is a technique that has been expanding due to its operational simplicity and economic feasibility. The selection of tolerant species with decontamination potential for a given group of molecules is the first step toward the success of this green technology. This study aimed to evaluate the potential of winter-sown green manures for phytoremediation of soil treated with the herbicides diuron and sulfentrazone, applied alone and in combination. In the field experiment, the dynamics of diuron (490 g ha⁻¹), sulfentrazone (245 g ha⁻¹), and diuron + sulfentrazone (490 + 245 g ha⁻¹) applied pre-emergence of the species *Avena strigosa*, *Vicia sativa*, *Secale cereale*, *Raphanus sativus*, *Fagopyrum esculentum*, *Lolium multiflorum*, *Lupinus albus*, and a mixture of these species were evaluated. Post-phytoremediation results indicated that, at 7 days after emergence (DAE), there was no phytotoxicity in the species treated with diuron, with the lowest incidence observed in *F. esculentum* at 14 and 21 DAE. There was no phytotoxicity to *V. sativa* caused by diuron at 28 and 35 DAE. Herbicide application did not cause phytotoxicity in *L. albus* and *V. sativa* up to 7 DAE, and these were the least affected species compared with the others. Shoot dry mass varied according to species

and herbicides, with higher accumulation in treatments without herbicides, in the species mixture, and in *L. albus*. The photosynthetic rates of *H. annuus* were positively influenced by phytoremediation with *S. cereale* and *F. esculentum*. Stomatal conductance did not differ among treatments, except for *H. annuus* in areas with *L. multiflorum*. Water use efficiency was higher with *S. cereale* and *F. esculentum*. The thousand-grain weight and grain yield of *H. annuus* and *S. bicolor* were influenced by the phytoremediator species and by the herbicides applied. The cover crop species exhibited varying phytoremediation potential, which influenced the succeeding crops.

Keywords: Herbicide mixtures. Bioremediation. *Carryover*. Residual herbicides.

INTRODUÇÃO

O controle de pragas (doenças, insetos e plantas daninhas) nas lavouras é indispensável para que se mantenha altas produções de alimentos ou até mesmo para que se tenha produto colhido com qualidade. O controle químico, por meio de agrotóxicos, é o método mais utilizado em função da eficiência, rapidez, praticidade e menor custo quando comparado a outras formas de controle (Camacho *et al.*, 2022; Das *et al.*, 2024). Entretanto, o uso indiscriminado e incorreto, pode causar impactos negativos ao meio ambiente, à saúde humana e também a contaminação de alimentos produzidos.

Um dos maiores problemas relacionados ao uso de herbicidas é o seu potencial de contaminação ambiental, atingindo áreas e vegetações não-alvo. Além disso, podem contaminar cursos hídricos próximos as áreas de aplicação e inviabilizar a sucessão de culturas sensíveis, chamado de *carryover* (Salomão *et al.*, 2020; Barroso *et al.*, 2023).

O diuron é um herbicida muito utilizado no Brasil para o controle das plantas daninhas nas culturas de algodão, café, cana-de-açúcar e citros, tanto em pré como em pós-emergência. De amplo espectro de ação, atua no controle de mono e dicotiledôneas, inibindo o Fotossistema II das plantas tratadas e sensíveis (Lu *et al.* 2018; Tandon *et al.*, 2019). A ampla utilização desse herbicida ocasiona problemas de contaminação do solo, por ser pouco lixiviável e apresentar elevada persistência na camada de 0 a 10 cm (Li *et al.*, 2021), com um tempo de meia-vida variado amplamente de dezenas a centenas de dias, a depender das condições físico-químicas do solo e atividade microbiana (Rocha *et al.*, 2013; Reis *et al.*, 2023). Essas características observadas em relação ao diuron fazem com que esse produto permaneça por mais tempo onde foi aplicado para o controle de

plantas daninhas, tornando assim o local às vezes até impróprio a determinados cultivos agrícolas sensíveis.

O sulfentrazone é um herbicida inibidor de protoporfirinogênio oxidase (PROTOX), utilizado nas culturas de café, cana-de-açúcar, citrus, eucalipto, soja e em áreas não agrícolas (AGROFIT, 2026). Esse herbicida apresenta longo efeito residual no solo, inviabilizando o cultivo de plantas sensíveis em sucessão à sua aplicação (Ferraço *et al.*, 2017; Ferraço *et al.*, 2019).

A mistura comercial composta por diuron + sulfentrazone, apresenta um possível sinergismo, o que possibilita o aumento do espectro de controle de plantas daninhas e do período residual. A mistura de herbicidas pode favorecer o manejo da resistência das plantas daninhas a moléculas, como por exemplo ao glyphosate (Sousa *et al.*, 2020). Na atualidade vem sendo muito utilizado, em lavouras de soja do Brasil as misturas comerciais envolvendo o diuron ou o sulfentrazone, tais como diuron + sulfentrazone, imazethapyr + sulfentrazone, sulfentrazone+S-metolachlor, sendo esses herbicidas normalmente associados ao glyphosate ou amônio-glufosinate para se aumentar o espectro de controle ou para o manejo de espécies de plantas daninhas resistentes ou tolerantes. No entanto, a dinâmica de duas ou mais moléculas em sinergia não é totalmente compreendida no ambiente, necessitando assim de estudos que venham a dar maior elucidação.

A dinâmica dos herbicidas no ambiente é influenciada pelas propriedades físico-químicas das moléculas, como solubilidade, coeficiente de partição, pressão de vapor e ionização, e por fatores ambientais, a exemplo da textura, teor de argila e matéria orgânica, pH e CTC do solo, além das condições de clima e manejo cultural (Takeshita *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019; Ćwieląg-Piasecka, 2023). Essas interações regulam processos de sorção, dessorção, lixiviação, volatilização e degradação, determinando a persistência dos produtos, seu potencial de transporte para águas superficiais e subterrâneas e a disponibilidade para as plantas e organismos edáficos (Wang *et al.*, 2019; Ghosh; Crist, 2022; Zaccaro-Gruener *et al.*, 2022).

Uma das estratégias para favorecer a dissipação e a rápida degradação de herbicidas consiste na melhoria das características físico-químicas e biológicas do solo por meio do uso de adubos verdes, que aumentam o carbono orgânico, a CTC, a estabilidade de agregados, a infiltração de água e a atividade microbiana. Diferentes espécies de adubos verdes elevam a biomassa microbiana, a respiração basal e a atividade enzimática do solo, ampliando a capacidade de degradação de pesticidas, seja pela maior

sorção e retenção em solos mais estruturados, seja pela intensificação da degradação microbiana e da rizodegradação em sistemas com cobertura vegetal contínua (Barroso *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024; Aliste *et al.*, 2025; Hu *et al.*, 2025; Zamignan *et al.*, 2025).

A fitorremediação, que consiste no uso de plantas para extrair e ou degradar herbicidas no ambiente, é uma técnica viável que vem sendo utilizada com maior frequência nos últimos anos (Franco *et al.*, 2014; Barroso, *et al.*, 2023; Araujo *et al.*, 2024). Espécies como *Avena strigosa*, *Vicia sativa*, *Secale cereale*, *Raphanus sativus*, *Fagopyrum esculentum*, *Lolium multiflorum* e *Lupinus albus* são amplamente utilizadas como plantas de cobertura, proporcionando melhorias nas características físicas e químicas do solo.

Essas plantas, por apresentar ciclo curto de desenvolvimento, podem ser utilizadas na entressafra das culturas, protegendo a área contra a incidência de plantas daninhas e com potencial para extração de resíduos de herbicidas persistentes. Além disso, as espécies usadas como cobertura podem proteger o solo contra erosão, ciclagem de nutrientes, sequestro de carbono, maior produtividade das culturas e a biomassa destas pode ser usada para a produção de bioenergia, tornando o processo ainda mais sustentável (Silva *et al.*, 2022; Barroso *et al.*, 2023; Pott *et al.*, 2023; Aryal, 2024; Besen *et al.*, 2024).

A seleção de espécies fitorremediadoras é a primeira etapa do processo de remediação dos solos. A seleção baseia-se na capacidade vegetativa da planta de absorver ou reter os poluentes, tolerar naturalmente o herbicida, descontaminar o solo, além de apresentar rápido crescimento, adaptação e bom estabelecimento inicial (Alves *et al.*, 2018a; Kafle *et al.*, 2022; Vasconcelos *et al.*, 2020). A espécie vegetal ativa a microbiota do solo e a decomposição dos compostos por meio da liberação de exsudatos pelas raízes, garantindo fontes alternativas de nutrientes e aumentando a tolerância aos herbicidas (Ferraço *et al.*, 2017; Afzal *et al.*, 2025; Hu *et al.*, 2025; Sibalekile *et al.*, 2025).

A hipótese do presente estudo é que o uso das espécies de adubos verdes semeados no inverno efetua a fitorremediação de solo tratado com diuron, sulfentrazone e diuro+sulfentrazone, tornando assim um ambiente propício para as culturas de girassol e sorgo semeadas em sucessão. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de adubos verdes semeados no inverno para fitorremediação do solo tratado com os herbicidas diuron, sulfentrazone e diuron + sulfentrazone.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na área experimental da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Campus Erechim/RS, latitude 27° 43' 31" S, longitude 52° 17' 40" W e altitude 650 m. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Aluminoférrico típico (Streck *et al.*, 2018), com as seguintes características químicas e físicas: pH em água de 5,6; M.O. = 3,2%; P = 9,7 mg dm⁻³; K = 134,4 mg dm⁻³; Al³⁺ = 0,0 cmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 6,7 cmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 3,1 cmol_c dm⁻³; CTC_{efetiva} = 10,1 cmol_c dm⁻³; CTC_{pH7} = 14,6 cmol_c dm⁻³; H+Al = 4,5 cmol_c dm⁻³; Saturação de bases = 69%, Argila = 72%; Areia = 5,1% e Silte = 22,9%. O clima predominante na região de acordo a classificação de Koppen é o Cfa, clima temperado, com verão ameno, chuvas uniformemente distribuídas, e a temperatura média do mês mais quente 22 °C, com precipitação de 1.100 a 2.000 mm, geadas severas e frequentes, num período médio de ocorrência de 10 a 25 dias anualmente (Peel *et al.*, 2007).

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, arranjo em esquema fatorial 3 x 9, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído pelas espécies vegetais; *Avena strigosa*, *Vicia sativa*, *Secale cereale*, *Raphanus sativus*, *Fagopyrum esculentum*, *Lolium multiflorum*, *Lupinus albus*, mix de *A. strigosa* + *V. sativa* + *S. cereale* + *R. sativus* + *L. multiflorum* e solo sem cultivo de nenhuma espécie. O segundo fator foi constituído pelos herbicidas diuron (Di) (490 g ha⁻¹), sulfentrazone (Su) (245 g ha⁻¹) e a mistura comercial composta por diuron + sulfentrazone (DS) (490 + 245 g ha⁻¹, respectivamente). As marcas comerciais dos herbicidas usados no experimento foram o Diuron Nortox 500 SC, Boral e Stone. O solo sem cultivo foi mantido livre de vegetação por meio de aplicações de glyphosate (1440 g ha⁻¹), sempre que necessário.

A semeadura das espécies com potencial fitorremediador foi realizada com semeadora/adubadora (KF 6040-A) em parcela com área de 3 x 6 m (18 m²) e a distribuição espacial é mostrada na Tabela 1. A correção da fertilidade do solo foi efetuada conforme as recomendações técnicas para as espécies (SBCS, 2016). Os herbicidas foram aplicados 24 h após a semeadura, utilizando um pulverizador costal de precisão, pressurizado a CO₂, equipado com quatro pontas de pulverização tipo leque DG 110.02, sob pressão constante de 210 kPa e velocidade de deslocamento de 3,6 km h⁻¹, o que proporcionou uma vazão de 150 L ha⁻¹ de calda.

Aos 7, 14, 21, 28 e 35 dias após a emergência (DAE) foram realizadas as avaliações de fitotoxicidade das espécies com potencial fitorremediador, atribuindo-se

notas de zero (ausência de injúria) a 100% (morte das plantas) de acordo com a metodologia proposta pela SBPCPD (1995).

Tabela 1. Espécies com potencial de fitorremediação, densidades, plantas m⁻², espaçamentos e número de linhas utilizados no experimento.

Espécie	Densidade (kg ha ⁻¹)	Plantas (m ⁻²)	Espaçamento (m)	Linhas semeadas
<i>Avena strigosa</i>	80	40	0,17	16
<i>Fagopyrum esculentum</i>	120	80	0,17	16
<i>Lolium multiflorum</i>	30	80	0,17	16
<i>Lupinus albus</i>	90	30	0,17	16
Mix de espécies	80	45	0,17	16
<i>Raphanus sativus</i>	1,5	40	0,17	16
<i>Secale cereale</i>	300	40	0,17	16
<i>Vicia sativa</i>	60	30	0,17	16

Aos 75 DAE, as espécies fitorremediadoras foram seccionadas rente ao solo, e determinada a massa seca da parte aérea (MSPA) a partir da secagem das plantas a temperatura de 60±5°C, por 48 h, em estufa de circulação forçada de ar (Meschede, 2007).

Para a semeadura das espécies bioindicadoras a área foi dessecada com glyphosate + saflufenacil (1440 g ha⁻¹ + 70 g ha⁻¹) + óleo mineral (0,5% v/v), aos dez dias antes da semeadura do *Sorghum bicolor* e *Helianthus annuus*. A adubação foi realizada em sulco de semeadura, 350 kg ha⁻¹ (formulação: 13-24-12 de N-P-K) de acordo com a análise química do solo (SBCS, 2016). Foram semeadas três linhas de *S. bicolor* e de *H. annuus* das cultivares BM 737 e ADV 5504, espaçadas a 0,50 m entre si, nas densidades de 17,5 e 6,0 sementes m⁻¹, respectivamente.

Aos 55 dias após a semeadura (DAS) do *S. bicolor* e *H. annuus* foram aferidas as variáveis referentes à fisiologia dessas culturas, tais como: taxa fotossintética (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração interna de CO₂ (C_i , $\mu\text{mol mol}^{-1}$), taxa de transpiração (E , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e a eficiência do uso da água (EUA, $\text{mol CO}_2 \text{mol H}_2\text{O}^{-1}$). A EUA foi calculada a partir da razão das variáveis A/E . Essas variáveis foram determinadas no terço médio das plantas, na primeira folha completamente expandida. Para isso, utilizou-se um analisador de gases de infravermelho (IRGA), marca ADC, modelo LCA PRO (Analytical Development Co. Ltd, Hoddesdon, UK). Cada cultura foi avaliada sob iluminação natural, entre sete e dez horas da manhã, em condições de céu limpo, de forma que se mantivessem as condições ambientais homogêneas durante as análises.

A colheita do *S. bicolor* e *H. annuus* foi realizada quando atingiram 19 e 12% de umidade respectivamente, em área útil de 1,5 m². O peso de mil grãos (PMG) foi aferido

por contagem de oito amostras de 100 grãos cada e, em seguida, pesadas em balança analítica. A partir disso, estimou-se a produtividade de grãos (PG), corrigindo-se o teor de umidade para 13% e extrapolando os dados para kg ha⁻¹.

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade e homogeneidade das variâncias e posteriormente à análise de variância pelo teste F. Quando significativas, as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott para o fator espécies e teste de Tukey para o fator herbicidas. Todos os testes foram submetidos a 5% de significância. A análise de componentes principais foi realizada com base em todas as variáveis, utilizando o software R.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aos 7 dias após emergência (DAE), não se observou fitotoxicidade em nenhuma das espécies tratadas com diuron (Di). Aos 14 DAE, as menores incidências de fitotoxicidade foram registradas em *F. esculentum*, enquanto que aos 21 DAE, ocorreram nos adubos verdes, *F. esculentum* e *L. albus*. Aos 28 e 35 DAE, não foram observadas ocorrências de fitotoxicidade causadas pelo herbicida Di (Tabela 2).

Quando os herbicidas sulfentrazone (Su) e diuron+sulfentrazone (DS) foram aplicados, aos 7 DAE não foi registrada fitotoxicidade nas espécies *L. albus* e *V. sativa*. Nas avaliações efetuadas aos 14, 21, 28 e 35 DAE, as espécies *L. albus* e *V. sativa* foram as menos afetadas pelos herbicidas sulfentrazone e diuron+sulfentrazone (Tabela 2).

Os menores acúmulos de massa seca da parte aérea (MSPA) foram observadas na presença de *A. strigosa* e *V. sativa*, nos tratamentos controle e com diuron. Observou-se os maiores acúmulos de MSPA na ausência do herbicida, na presença do mix de espécies e ao *L. albus* (Figura 1). Com a utilização do Diuron a MSPA da *R. sativus*, *F. esculentum* e *L. multiflorum* foi maior quando comparado aos demais tratamentos. A utilização da *S. cereale*, não gerou diferença significativa entre os tratamentos com herbicidas ou com o controle.

A fitorremediação dos solos utilizando *S. cereale* e *F. esculentum* nos tratamentos com diuron, sulfentrazone e diuron + sulfentrazone, as plantas de *H. annuus* apresentaram taxa fotossintética (*A*) mais elevadas. A condutância estomática (*gs*) do *H. annuus* não diferiu entre tratamentos nas áreas com e sem espécies de cobertura. Houve uma diminuição dessa variável no *H. annuus* apenas quando foi semeado como cobertura

verde no inverno o *L. multiflorum*, para todos os herbicidas avaliados, quando comparados ao tratamento controle (Figura 2; Tabela 3).

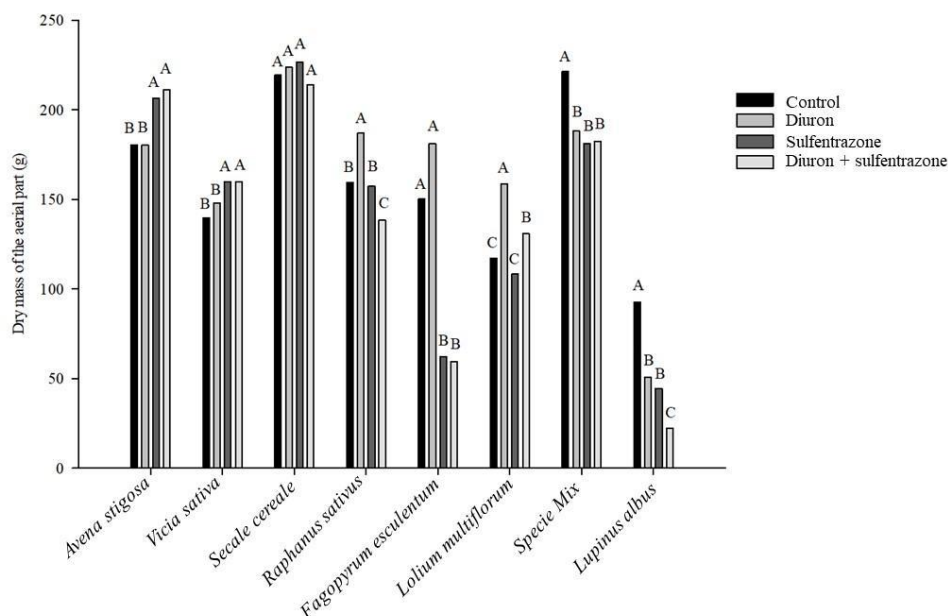
Tabela 2. Fitotoxicidade (%) de *Avena strigosa* (1), *Fagopyrum esculentum* (2), *Lolium multiflorum* (3), *Lupinus albus* (4), *Raphanus sativus* (5), *Secale cereale* (6), *Vicia sativa* (7) e mix de espécies (8), submetidas aos tratamentos com diuron (Di), sulfentrazone (Su) e diuron+sulfentrazone (DS), avaliadas aos 7, 14, 21, 28 e 35 dias após a emergência (DAE).

Tratamentos	Espécies vegetais							
	Fitotoxicidade aos 7 DAE							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Controle	0,0 B ^{ns}	0,0 C	0,0 C	0,0 A	0,0 C	0,0 C	0,0 A	0,0 B
Diuron	0,0 B ^{ns}	0,0 C	0,0 C	0,0 A	0,0 C	0,0 C	0,0 A	0,0 B
Sulfentrazone	13,0 Ac	38,6 Aa	15,0 Ab	0,0 Af	6,0 Be	13,6 Ac	0,0 Af	10,0 Ad
Diuron+sulfentrazone	14,2 Ab	31,4 Ba	10,7 Bc	0,0 Ae	9,3 Ac	7,7 Bd	0,0 Ae	10,0 Ac
Tratamentos	Fitotoxicidade aos 14 DAE							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	1	2	3	4	5	6	7	8
Controle	0,0 D ^{ns}	0,0 C	0,0 D	0,0 C	0,0 D	0,0 D	0,0 C	0,0 D
Diuron	10,0 Ca	1,7 Bc	10,0 Ca	5,7 Bb	6,0 Cb	5,0 Cb	8,7 Aa	5,8 Cb
Sulfentrazone	21,0 Bc	60,0 Aa	23,6 Ab	11,0 Ae	12,3 Be	16,0 Bd	5,0 Bf	20,8 Ac
Diuron+sulfentrazone	29,0 Ab	59,0 Aa	19,3 Bc	11,0 Ae	19,0 Ac	17,7 Ad	5,0 Bf	19,3 Bc
Tratamentos	Fitotoxicidade aos 21 DAE							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	1	2	3	4	5	6	7	8
Controle	0,0 C ^{ns}	0,0 B	0,0 C	0,0 C	0,0 C	0,0 D	0,0 B	0,0 C
Diuron	1,5 Cb	0,0 Bc	5,0 Ba	0,0 Cc	1,7 Cb	5,4 Ca	5,0 Aa	1,5 Cb
Sulfentrazone	21,4 Bb	58,6 Aa	19,6 Ac	8,7 Ae	10,7 Bd	18,6 Ac	0,0 Bf	18,6 Ac
Diuron+sulfentrazone	24,4 Ab	58,9 Aa	18,6 Ac	6,5 Bg	14,4 Ae	12,7 Bf	0,0 Bh	16,2 Bd
Tratamentos	Fitotoxicidade aos 28 DAE							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	1	2	3	4	5	6	7	8
Controle	0,0 B ^{ns}	0,0 C	0,0 B	0,0 B	0,0 C	0,0 C	0,0 A	0,0 B
Diuron	1,5 B ^{ns}	0,0 C	0,0 B	0,0 a	0,8 C	1,5 C	0,0 A	0,0 B
Sulfentrazone	18,6 Ab	48,6 Ba	18,0 Ab	4,4 Ae	9,3 Be	14,4 Ac	0,0 Af	12,3 Ad
Diuron+sulfentrazone	19,3 Ab	50,6 Aa	17,7 Ac	0,0 Be	13,0 Ad	12,3 Bd	0,0 Ae	11,3 Ad
Tratamentos	Fitotoxicidade aos 35 DAE							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	1	2	3	4	5	6	7	8
Controle	0,0 B ^{ns}	0,0 C	0,0 C	0,0 A	0,0 C	0,0 C	0,0 A	0,0 B
Diuron	0,0 B ^{ns}	0,0 C	0,0 C	0,0 A	0,0 C	0,0 C	0,0 A	0,0 B
Sulfentrazone	13,0 Ac	38,6 Aa	15,0 Ab	0,0 Af	6,0 Be	13,6 Ac	0,0 Af	10,0 Ad
Diuron+sulfentrazone	14,2 Ab	31,4 Ba	10,7 Bc	0,0 Ae	9,3 Ac	7,7 Bd	0,0 Ae	10,0 Ac

As doses aplicadas dos herbicidas foram; diuron - 490 g ha⁻¹, sulfentrazone - 245 g ha⁻¹ e diuron + sulfentrazone - 490 + 245 g ha⁻¹. As médias seguidas por diferentes letras minúsculas na linha e maiúsculas na coluna diferem significativamente pelos testes de Scott-Knott e Tukey, respectivamente, a p≤0,05. ^{ns} Não significativo a p≤0,05.

A concentração interna de CO₂ (Ci) do *H. annuus* foi maior nas áreas fitorremediadas com *V. sativa* em solos tratados com diuron, e com *A. strigosa* quando aplicou-se o sulfentrazone e o diuron+sulfentrazone. Resultado similar foi observado ao se usar o *R. sativus* e o mix nas aplicações de diuron e *F. esculentum* nas áreas com diuron+sulfentrazone. A diminuição da Ci do *H. annuus* foi observada no cultivo de áreas com as demais espécies vegetais e sem cobertura com herbicidas, quando comparados na ausência de herbicida (Figura 2; Tabela 3).

Figura 1. Massa seca da parte aérea de plantas de coberturas manejadas com herbicidas, avaliadas aos 75 dias após a emergência. As médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. Foram aplicadas doses de diuron - 490 g ha⁻¹, sulfentrazone - 245 g ha⁻¹ e diuron + sulfentrazone - 490 + 245 g ha⁻¹. CV = 6,83%.



A taxa transpiratória (E) do *H. annuus* foi menor no local fitorremediado por *A. strigosa* para os herbicidas diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone. A utilização de *F. esculentum* nas áreas manejadas com sulfentrazone, sem herbicida ou sem cobertura vegetal, gerou uma maior taxa transpiratória para o *H. annuus* (Figura 3; Tabela 3). Os demais tratamentos mantiveram a E igual ao controle sem herbicida (Figura 2; Tabela 3).

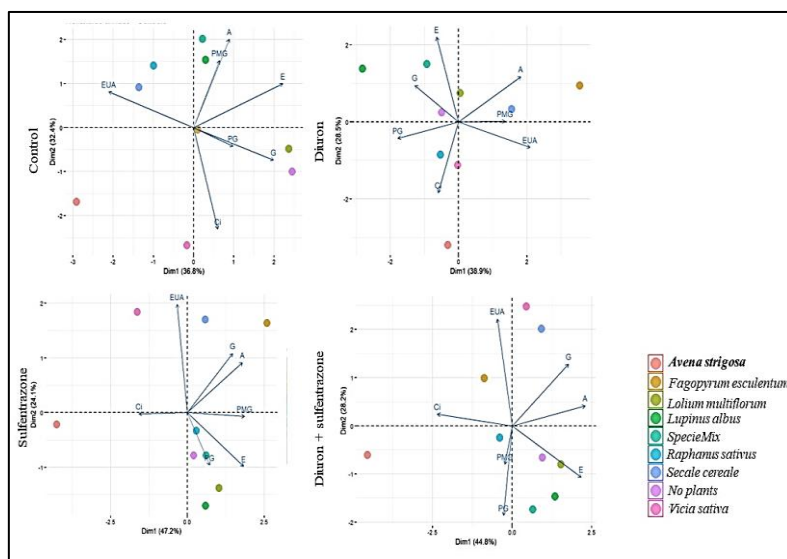


Figura 2. Análise dos principais componentes da taxa fotossintética (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 (C_i , $\mu\text{mol mol}^{-1}$), taxa de transpiração (E , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), eficiência do uso da água (EUA , $\text{mol CO}_2 \text{mol}$

H₂O⁻¹), peso de mil grãos (PMG, kg) e produtividade de grãos (PG, t ha⁻¹) de *Helianthus annuus* em função da aplicação de herbicidas (diuron, sulfentrazone e diuron + sulfentrazone) e uso de plantas de cobertura potencialmente fitorremediadoras. Foram aplicadas doses de diuron 490 g ha⁻¹, sulfentrazone 245 g ha⁻¹ e diuron + sulfentrazone 490 + 245 g ha⁻¹.

A eficiência do uso da água (EUA) do *H. annuus* foi maior nas áreas onde havia sido cultivado o *S. cereale* e o *F. esculentum* para os herbicidas diuron e sulfentrazone, e *S. cereale* e *L. multiflorum* para a mistura de diuron+sulfentrazone. Para as demais espécies vegetais, todos os tratamentos com herbicidas mantiveram o EUA igual ou maior do que o controle (Figura 2; Tabela 3).

Tabela 3. Taxa fotossintética (*A*), condutância estomática ao vapor d'água (*gs*), concentração interna de CO₂ (*Ci*), taxa de transpiração (*E*), eficiência do uso da água (EUA) de *Helianthus annuus* em função da aplicação de diuron (Di), sulfentrazone (Su) e diuron + sulfentrazone (DS) e uso de plantas de cobertura potencialmente fitorremediadoras.

Espécie	<i>A</i> (μmol m ⁻² s ⁻¹)				<i>gs</i> (mol m ⁻² s ⁻¹)			
	Cont	Di	Su	DS	Cont	Di	Su	DS
<i>Avena strigosa</i>	13,8 Ae	13,4 Ae	14,2 Ad	13,5 Ac	0,6 Ab	0,6 Aa	0,6 Aa	0,4 Aa
<i>Fagopyrum esculentum</i>	18,1 Cd	34,6 Aa	34,3 Aa	28,2 Bb	0,8 Ab	0,7 Aa	1,2 Aa	0,5 Aa
<i>Lolium multiflorum</i>	24,3 Cc	28,3 Bb	27,5 Bc	32,8 Aa	1,5 Aa	0,7 Ba	0,9 Ba	0,7 Ba
<i>Lupinus albus</i>	24,8 Bc	18,5 Cd	27,3 Ac	29,2 Ab	0,8 Ab	1,2 Aa	0,7 Aa	0,7 Aa
<i>Raphanus sativus</i>	23,6 Bc	19,3 Cd	29,7 Ab	25,1 Bb	0,5 Ab	0,8 Aa	0,7 Aa	0,6 Aa
Mix de espécies	31,6 Aa	20,8 Cd	29,4 Ab	27,2 Bb	0,8 Ab	0,9 Aa	0,8 Aa	0,7 Aa
<i>Secale cereale</i>	27,2 Bb	33,1 Aa	33,4 Aa	31,7 Aa	0,8 Ab	0,9 Aa	0,8 Aa	0,9 Aa
<i>Vicia sativa</i>	16,3 Cd	24,4 Bc	30,3 Ab	27,1 Ab	1,0 Aa	1,1 Aa	0,8 Aa	0,9 Aa
Sem cobertura	23,2 Bc	25,5 Ac	27,6 Ac	27,5 Ab	1,0 Aa	0,8 Aa	0,7 Aa	0,7 Aa
Espécie	<i>Ci</i> (μmol mol ⁻¹)				<i>E</i> (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)			
	Cont	Di	Su	DS	Cont	Di	Su	DS
<i>Avena strigosa</i>	302,6 Dc	320,8 Cb	341,4 Aa	324,1 Ba	4,0 Ac	3,9 Ac	4,2 Ac	3,7 Ad
<i>Fagopyrum esculentum</i>	259,9 Ae	198,4 Ch	244,5 Be	258,1 Ab	7,3 Bb	7,5 Bb	8,9 Aa	6,8 Bc
<i>Lolium multiflorum</i>	289,8 Ad	231,9 Cg	245,1 Be	214,9 Dh	10,1 Aa	8,7 Aa	9,8 Aa	9,1 Aa
<i>Lupinus albus</i>	258,2 Be	230,2 Cg	303,0 Ac	211,3 Di	9,3 Aa	9,5 Aa	9,4 Aa	9,2 Aa
<i>Raphanus sativus</i>	234,0 Dg	263,8 Ad	253,0 Bd	247,7 Cd	7,3 Ab	6,5 Ab	7,9 Aa	7,7 Ab
Mix de espécies	215,8 Ch	241,7 Af	205,8 Dh	235,7 Be	9,8 Aa	10,1 Aa	9,3 Aa	9,4 Aa
<i>Secale cereale</i>	252,3 Af	248,5 Be	214,7 Cg	251,3 Ac	7,1 Ab	7,3 Ab	7,1 Ab	7,5 Ab
<i>Vicia sativa</i>	345,4 Aa	341,9 Ba	322,0 Cb	228,4 Df	6,4 Ab	6,5 Ab	6,2 Ab	6,2 Ac
Sem cobertura	333,6 Ab	289,1 Bc	223,4 Cf	225,4 Cg	10,7 Aa	9,0 Ba	9,5 Ba	9,3 Ba
Espécie	EUA (mol CO ₂ mol H ₂ O ⁻¹)							
	Cont	Di	Su	DS	Cont	Di	Su	DS
<i>Avena strigosa</i>	3,7 Aa	3,6 Ab	3,5 Ab	3,7 Aa				
<i>Fagopyrum esculentum</i>	2,6 Bb	4,6 Aa	3,9 Ab	4,2 Aa				
<i>Lolium multiflorum</i>	2,4 Bb	3,3 Ab	2,8 Bc	3,6 Aa				
<i>Lupinus albus</i>	2,7 Ab	2,0 Bd	2,9 Ac	3,2 Ab				
<i>Raphanus sativus</i>	3,3 Aa	3,0 Ac	3,8 Ab	3,3 Ab				
Mix de espécies	3,3 Aa	2,1 Bd	3,2 Ac	2,9 Ab				
<i>Secale cereale</i>	3,8 Aa	4,6 Aa	4,7 Aa	4,2 Aa				
<i>Vicia sativa</i>	2,6 Cb	3,8 Bb	4,9 Aa	4,4 Aa				
Sem cobertura	2,2 Bb	2,9 Ac	2,9 Ac	3,0 Ab				

Foram aplicadas doses de diuron - 490 g ha⁻¹, sulfentrazone - 245 g ha⁻¹ e diuron + sulfentrazone - 490 + 245 g ha⁻¹. As médias seguidas por diferentes letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey e Scott-Knott, respectivamente, a 5% de significância.

O peso de mil grãos (PMG) de *H. annuus* foi maior nas áreas contendo diuron e sulfentrazone, fitorremediadas por *F. esculentum*. Quando utilizado a mistura diuron+sulfentrazone e o fitorremediador *F. esculentum* e *L. albus* o PMG de *H. annuus* foi maior. A diminuição do PMG do *H. annuus* foi observado nas áreas contendo diuron+sulfentrazone fitorremediadas com *R. sativus*; *L. multiflorum* e *L. albus* na fitorremediação de diuron, e nas áreas sem cobertura com diuron e com diuron+sulfentrazone. (Figura 2, Tabela 4).

A produtividade de grãos (PG) do *H. annuus* foi maior nas áreas com diuron e sulfentrazone, fitorremediadas com *L. albus*, e nas áreas com diuron+sulfentrazone manejadas com *A. strigosa*. A produtividade do *H. annuus* diminuiu em relação ao tratamento sem herbicida nas parcelas onde foram semeadas as espécies *A. strigosa* com sulfentrazone, *R. sativus* com diuron+sulfentrazone, *F. esculentum*, mix de espécies e sem cobertura com diuron (Figura 2, Tabela 4).

Tabela 4. Peso de mil grãos (PMG- g) e produtividade de grãos (PG - kg ha⁻¹) de *Helianthus annuus* após fitorremediação de solos com ausência e presença de diuron (Di), sulfentrazone (Su) e diuron+sulfentrazone (DS) com espécies de plantas de cobertura.

Espécie	Peso de mil grãos (g)			
	Controle	Diuron	Sulfentrazone	Diuron+sulfentrazone
<i>Avena strigosa</i>	46,0 Ce	52,0 Ad	48,9 Bd	53,9 Ab
<i>Fagopyrum esculentum</i>	60,5 Cb	73,0 Aa	65,3 Ba	60,5 Ca
<i>Lolium multiflorum</i>	52,4 Bc	45,1 Ce	55,9 Ac	54,6 Ab
<i>Lupinus albus</i>	65,1 Aa	52,3 Cd	60,9 Bb	59,9 Ba
<i>Raphanus sativus</i>	59,8 Bb	65,2 Ab	56,9 Cc	54,3 Db
Mix de espécies	51,2 Bc	53,8 Ad	55,5 Ac	52,9 Bb
<i>Secale cereale</i>	48,9 Bd	54,8 Ac	55,2 Ac	55,3 Ab
<i>Vicia sativa</i>	44,7 Ce	56,9 Ac	50,7 Bd	42,7 Cd
Sem cobertura	53,6 Ac	45,7 Be	55,1 Ac	47,6 Bc

Espécie	Produtividade de grãos (kg ha ⁻¹)			
	Controle	Diuron	Sulfentrazone	Diuron+sulfentrazone
<i>Avena strigosa</i>	2122,3 Cf	2440,6 Bc	1629,9 Dh	3309,8 Aa
<i>Fagopyrum esculentum</i>	2597,0 Ab	1650,6 Dh	1841,8 Cg	2082,9 Bi
<i>Lolium multiflorum</i>	2317,8 Dd	2380,0 Cd	3281,6 Ab	3251,7 Bc
<i>Lupinus albus</i>	1515,8 Di	3011,5 Ca	3377,2 Aa	3192,8 Bd
<i>Raphanus sativus</i>	2399,9 Cc	2827,3 Bb	3227,6 Ac	2296,7 Dg
Mix de espécies	2267,8 Ce	1938,7 Dg	2314,3 Be	3259,7 Ab
<i>Secale cereale</i>	2056,9 Dg	2130,2 Cf	2437,5 Ad	2141,2 Bh
<i>Vicia sativa</i>	1997,1 Dh	2142,5 Be	2120,0 Cf	2502,4 Af
Sem cobertura	2888,1 Aa	2138,9 Ce	1493,8 Di	2675,9 Be

Foram aplicadas doses de diuron - 490 g ha⁻¹, sulfentrazone - 245 g ha⁻¹ e diuron + sulfentrazone - 490 + 245 g ha⁻¹. As médias seguidas por diferentes letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey e Scott-Knott, respectivamente, com 5% de significância.

A taxa fotossintética do *S. bicolor* foi maior nas áreas fitorremediadas por *L. multiflorum*, *L. albus*, sem cobertura e mix de espécies, contendo diuron; sem cobertura com sulfentrazone; e *L. albus* e mix de espécies para a mistura de diuron+sulfentrazone.

A diminuição da fotossíntese para *S. bicolor* foi observada nas áreas fitorremediadas com *S. cereale* e sem cobertura vegetal contendo diuron+sulfentrazone; *L. multiflorum* após a aplicação de sulfentrazone e diuron+sulfentrazone; o mix para a fitorremediação de sulfentrazone. Os demais tratamentos foram maiores ou iguais ao controle (Figura 3, Tabela 5).

A condutância estomática e transpiração do *S. bicolor* foram maiores na área fitorremediada com *A. strigosa*, contendo diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone. Não houve diminuição da *gs* e *E*, e diferença estatística entre os tratamentos contendo herbicida (Figura 3, Tabela 5). A diminuição da *Ci* no *S. bicolor* foi menor nos locais onde a espécie fitorremediadora envolveu o *S. cereale* e a *V. sativa* contendo sulfentrazone; e *F. esculentum* com diuron e sulfentrazone. Para as demais espécies vegetais e sem cobertura, os herbicidas aumentaram ou foram iguais ao tratamento controle para a concentração interna de CO_2 do *S. bicolor* (Tabela 5).

A EUA do *S. bicolor* foi maior nas áreas fitorremediadas com *L. multiflorum* e o mix de plantas para o herbicida diuron; *F. esculentum*, *L. multiflorum*, mix, *L. albus* e sem cobertura para o sulfentrazone; e mix, *L. albus* e sem cobertura para a mistura de diuron+sulfentrazone. A diminuição do EUA do *S. bicolor* foi observada nas áreas sem herbicida cultivados o *L. multiflorum* e o mix, quando comparado a adição de diuron e diuron+sulfentrazone (Figura 3, Tabela 5).

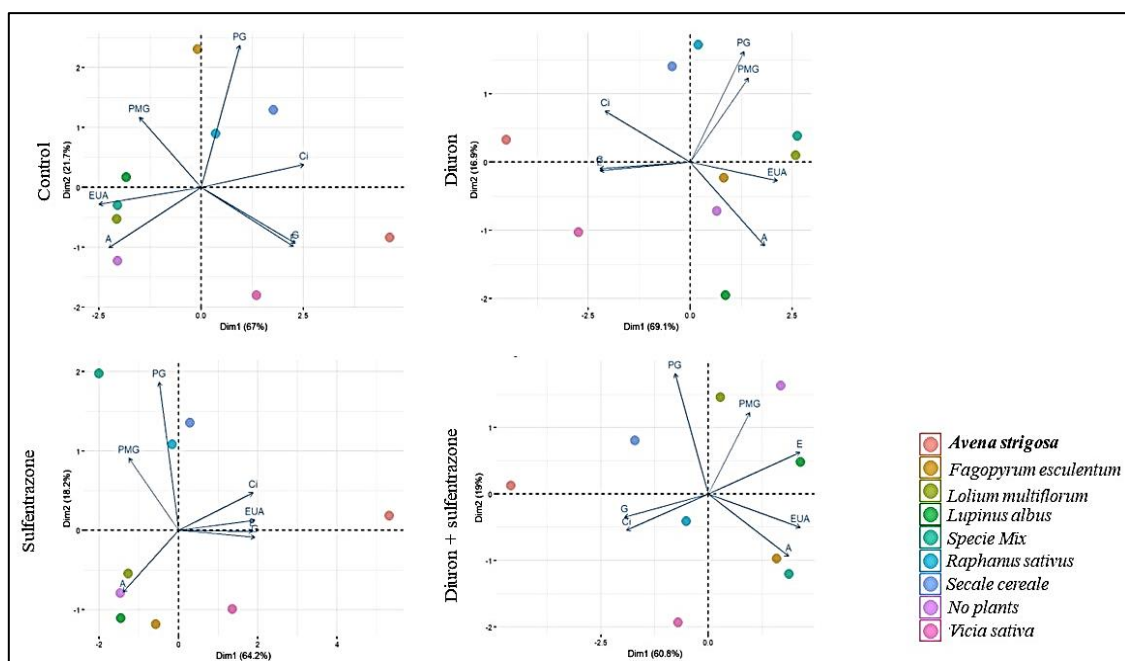


Figura 3. Análise dos principais componentes da taxa fotossintética (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (gs , $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 (Ci , $\mu\text{mol mol}^{-1}$), taxa de transpiração (E , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), eficiência do uso da água (EUA, $\text{mol CO}_2 \text{mol}$

H₂O⁻¹), peso de mil grãos (PMG, kg) e produtividade de grãos (PG, t ha⁻¹) de *Sorghum bicolor* em função da aplicação de herbicidas (diuron, sulfentrazone e diuron + sulfentrazone) e uso de plantas de cobertura potencialmente fitorremediadoras. Foram aplicadas doses de diuron - 490 g ha⁻¹, sulfentrazone - 245 g ha⁻¹ e diuron + sulfentrazone - 490 + 245 g ha⁻¹.

O PMG do *S. bicolor* não diferiu entre as áreas fitorremediadas e sem cobertura, contendo diuron; as áreas com sulfentrazone, a fitorremediação mais promissora foi com o mix de espécies; e em diuron+sulfentrazone, utilizando as espécies *F. esculentum*, *L. albus*, *R. sativus*, *S. cereale*. O PMG do *S. bicolor* diminuiu nas áreas fitorremediadas por *L. albus* e sem cobertura para o Di; *F. esculentum*, sem cobertura e *R. sativus* com sulfentrazone; e, *L. albus* e *R. sativus* e com a mistura de diuron+sulfentrazone (Figura 3, Tabela 6).

Tabela 5. Taxa fotossintética (*A*), condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (Ci), taxa de transpiração (*E*), eficiência do uso da água (EUA) de *Sorghum bicolor* em função da aplicação de controle (Cont), diuron (Di), sulfentrazone (Su) e diuron + sulfentrazone (DS) e uso de plantas de cobertura potencialmente fitorremediadoras.

Espécie	<i>A</i> (μmol m ⁻² s ⁻¹)				gs (mol m ⁻² s ⁻¹)			
	Cont	Di	Su	DS	Cont	Di	Su	DS
<i>Avena strigosa</i>	6,3 Af	7,0 Ad	7,2 Ae	5,3 Ae	0,8 Aa	0,8 Aa	0,7 Aa	0,9 Aa
<i>Fagopyrum esculentum</i>	14,0 Bd	16,2 Ab	14,8 Bc	17,0 Ab	0,2 Ac	0,1 Ac	0,1 Ac	0,1 Ac
<i>Lolium multiflorum</i>	21,6 Ab	21,6 Aa	17,4 Bc	9,1 Cd	0,1 Ac	0,1 Ac	0,1 Ac	0,1 Ac
<i>Lupinus albus</i>	20,5 Ab	22,4 Aa	22,5 Ab	21,8 Aa	0,1 Ac	0,1 Ac	0,1 Ac	0,1 Ac
<i>Raphanus sativus</i>	13,1 Ad	12,7 Ac	12,5 Ad	12,5 Ac	0,2 Ac	0,2 Ac	0,1 Ac	0,1 Ac
Mix de espécies	20,7 Ab	20,3 Aa	16,6 Bc	21,1 Aa	0,1 Ac	0,1 Ac	0,1 Ac	0,1 Ac
<i>Secale cereale</i>	10,9 Be	14,5 Ac	15,3 Ac	6,3 Ce	0,3 Ab	0,3 Ac	0,2 Ac	0,2 Ac
<i>Vicia sativa</i>	17,4 Ac	16,2 Ab	16,8 Ac	17,0 Ab	0,4 Ab	0,6 Ab	0,4 Ab	0,4 Ab
Sem cobertura	28,7 Aa	21,7 Ba	28,9 Aa	15,6 Cb	0,2 Ac	0,2 Ac	0,2 Ac	0,1 Ac
Espécie	Ci (μmol mol ⁻¹)				<i>E</i> (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)			
	Cont	Di	Su	DS	Cont	Di	Su	DS
<i>Avena strigosa</i>	407,2 Ba	393,4 Da	400,7 Ca	411,1 Aa	4,3 Aa	4,4 Aa	4,3 Aa	4,3 Aa
<i>Fagopyrum esculentum</i>	237,0 Bd	139,7 Df	177,1 Ce	270,8 Ad	1,4 Ac	1,4 Ad	1,1 Ac	1,5 Ac
<i>Lolium multiflorum</i>	72,0 Dh	86,6 Ch	132,7 Af	116,1 Bh	1,4 Ac	1,1 Ad	1,4 Ac	1,3 Ac
<i>Lupinus albus</i>	85,7 Cg	90,2 Bg	111,6 Ai	91,7 Bi	1,6 Ac	1,7 Ac	1,7 Ac	1,7 Ac
<i>Raphanus sativus</i>	232,4 De	275,1 Ad	251,4 Cc	263,1 Be	1,7 Ac	1,6 Ad	1,5 Ac	1,5 Ac
Mix de espécies	67,3 Di	86,5 Ch	118,5 Bh	122,6 Ag	1,3 Ac	1,3 Ad	1,4 Ac	1,6 Ac
<i>Secale cereale</i>	310,1 Bb	324,9 Ac	276,4 Cb	326,4 Ab	2,3 Ab	2,2 Ac	2,1 Ab	2,6 Ab
<i>Vicia sativa</i>	250,9 Cc	375,3 Ab	240,2 Dd	301,9 Bc	2,6 Ab	3,0 Ab	2,5 Ab	2,6 Ab
Sem cobertura	118,4 Df	176,4 Be	127,6 Cg	181,9 Af	2,1 Ab	2,0 Ac	1,9 Ab	1,5 Ac
Espécie	EUA (mol CO ₂ mol H ₂ O ⁻¹)							
	Cont	Di	Su	DS	Cont	Di	Su	DS
<i>Avena strigosa</i>	1,5 Ac	1,6 Ad	1,8 Ac	1,2 Ac				
<i>Fagopyrum esculentum</i>	10,0 Ab	12,6 Ab	13,4 Aa	12,9 Aa				
<i>Lolium multiflorum</i>	15,7 Aa	20,2 Aa	12,8 Ba	7,0 Cb				
<i>Lupinus albus</i>	12,9 Aa	12,8 Ab	13,2 Aa	12,8 Aa				
<i>Raphanus sativus</i>	8,0 Ab	8,3 Ac	8,4 Ab	8,3 Ab				
<i>Secale cereale</i>	4,9 Ac	7,1 Ac	7,7 Ab	3,1 Ac				
Mix de espécies	16,9 Aa	21,1 Aa	12,0 Ba	13,0 Ba				
<i>Vicia sativa</i>	7,2 Ab	5,9 Ac	7,4 Ab	7,4 Ab				
Sem cobertura	14,1 Aa	10,8 Ab	15,04 Aa	10,6 Aa				

Foram aplicadas doses de diuron 490 g ha⁻¹, sulfentrazone 245 g ha⁻¹ e diuron + sulfentrazone 490 + 245 g ha⁻¹. As médias seguidas por diferentes letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey e Scott-Knott, respectivamente, com 5% de significância.

A PG do *S. bicolor* foi maior nas áreas fitorremediada com *L. multiflorum* para o diuron, e o mix de espécies para fitorremediar sulfentrazone e *A. strigosa* para diuron+sulfentrazone. A PG do *S. bicolor* diminuiu em relação ao tratamento sem herbicida nas parcelas onde foram semeadas *A. strigosa* com sulfentrazone, *V. sativa* com sulfentrazone e diuron+sulfentrazone (Figura 3, Tabela 6).

As espécies vegetais utilizadas neste estudo como fitorremediadoras foram tolerantes a molécula de diuron, mesmo com uma leve incidência inicial de injúria (< 10%), desaparecendo por completo aos 35 DAE (Tabela 2). Espécies de adubos verdes como *Crotalaria* sp., *L. albus*, *R. sativus* e *Triticum* sp., utilizadas como potenciais fitorremediadoras foram relatadas com baixa fitotoxicidade e injúrias quando expostas a molécula de diuron (Pascal-Lorber *et al.*, 2010; Teófilo *et al.*, 2020) e *V. sativa* ao diuron e a linuron (Alves *et al.*, 2019; Souto *et al.*, 2020). A espécie *F. esculentum* foi a mais tolerante ao ser exposta pelo diuron neste trabalho. No Brasil, especialmente na Região Sul, muitos produtores tem utilizado *F. esculentum* como adubo verde, cobertura de solo em mix de coberturas, ou mesmo para produção de grãos destinados para a alimentação humana e animal, ou até mesmo para produção de sementes.

A variação da fitotoxicidade ao longo do tempo correlaciona-se com a espécie de adubo verde empregada na fitorremediação, observando-se a capacidade das plantas em se recuperar das injúrias provocadas por diuron, sulfentrazone e sua combinação (Tabela 2). Essa resposta ocorre porque o grau de sensibilidade vegetal decorre tanto da natureza da molécula quanto de sua concentração no solo (Conciani *et al.*, 2022).

As espécies de *A. strigosa* e *L. albus* possuem potencial para fitorremediação do sulfentrazone (Alves *et al.*, 2019), *R. sativus* e *L. albus* do diuron (Teófilo *et al.*, 2020), *S. cereale* tolera e descontamina solo com presença de herbicidas inibidores de PROTOX (Cornelius; Bradley, 2017). O *L. multiflorum* sofre efeito negativo se aplicado sobre esses herbicidas inibidores de PROTOX, mas consegue deixar menos resíduos para a cultura subsequente (Whalen *et al.*, 2019). A *V. sativa* apresenta potencial de fitorremediar os solos tratados com herbicidas inibidores de PROTOX (Cornelius *et al.*, 2017; Alves *et al.*, 2019), além das imidazolinonas (Galon *et al.*, 2014; Souto *et al.*, 2020) e metade da dose de atrazine (Galon *et al.*, 2017).

Ocorre tolerância das espécies na presença do sulfentrazone e na mistura de diuron+sulfentrazone, sendo que o *L. albus* e a *V. sativa* foram as menos afetadas pelas moléculas (Tabela 2). Descrita como tolerante, a *V. sativa* tolera herbicidas do grupo das imidazolinonas (imazethapyr, imazapic e imazapyr), chegando a degradar 94% do resíduo no solo (Souto *et al.*, 2020). A capacidade de fitorremediação da *V. sativa* e *L. albus* da molécula de diuron e diuron+sulfentrazone ainda não havia sido descrita, como há relato para o sulfentrazone e fomesafen (Alves *et al.*, 2019). Os resultados sugerem que *V. sativa* e *L. albus* possuem a capacidade de remediação do solo do grupo de herbicida, inibidores de FS II (diuron) e de PROTOX (sulfentrazone).

Tabela 6. Peso de mil grãos (PMG) e produtividade de grãos (PG) de *Sorghum bicolor* após fitorremediação de solos com ausência e presença de diuron (Di), sulfentrazone (Su) e diuron+sulfentrazone (DS) com espécies de plantas de cobertura.

Espécie	PMG (g)			
	Controle	Diuron	Sulfentrazone	Diuron+sulfentrazone
<i>Avena strigosa</i>	27,3 Ab	27,9 Aa	25,7 Ad	27,4 Ab
<i>F. esculentum</i>	30,1 Aa	28,4 Aa	25,8 Bd	30,1 Aa
<i>L. multiflorum</i>	28,9 Aa	28,7 Aa	28,7 Ac	28,2 Ab
<i>Lupinus albus</i>	30,7 Aa	27,8 Ba	30,6 Ab	28,9 Ba
<i>Raphanus sativus</i>	28,4 Ab	29,2 Aa	26,6 Bd	26,8 Ba
Mix de espécies	28,0 Bb	29,6 Ba	33,8 Aa	27,3 Bb
<i>Secale cereale</i>	28,1 Ab	8,9 Aa	29,2 Ac	29,3 Aa
<i>Vicia sativa</i>	25,1 Ac	26,2 Aa	26,6 Ad	27,1 Ab
Sem cobertura	30,4 Aa	29,4 Ba	28,6 Bc	31,4 Aa
Espécie	PG (kg ha ⁻¹)			
	Controle	Diuron	Sulfentrazone	Diuron+sulfentrazone
<i>Avena strigosa</i>	1620,0 Bd	1340,1 Ci	1332,5 Df	1952,8 Aa
<i>F. esculentum</i>	2345,1 Aa	1841,2 Be	1098,3 Ch	777,3 Dh
<i>Lolium multiflorum</i>	1267,2 Dg	2534,1 Aa	1366,0 Ce	1893,9 Bb
<i>Lupinus albus</i>	1399,2 Bf	1382,5 Ch	1054,1 Di	1755,2 Ac
<i>Raphanus sativus</i>	1817,6 Cc	2394,6 Ab	2199,8 Bb	1559,5 De
Mix de espécies	1435,7 Ce	2342,2 Bd	2347,3 Aa	1159,4 Df
<i>Secale cereale</i>	2136,4 Cb	2348,1 Ac	2164,0 Bc	1557,3 De
<i>Vicia sativa</i>	1170,5 Bh	1653,4 Af	1126,1 Cg	935,0 Dg
Sem cobertura	1046,7 Di	1483,0 Cg	1649,3 Bd	1722,2 Ad

Foram aplicadas doses de diuron - 490 g ha⁻¹, sulfentrazone - 245 g ha⁻¹ e diuron + sulfentrazone - 490 + 245 g ha⁻¹. As médias seguidas por diferentes letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey e Scott-Knott, respectivamente, com 5% de significância.

O comportamento de duas moléculas em sinergismo no solo pode gerar ações diferentes da aplicação dessas em individual. A capacidade da *V. sativa* em tolerar misturas comerciais já foi diagnosticada como o uso imazapic + imazapyr e chlorimuron-ethyl + sulfometuron-methyl (Galon *et al.*, 2014; Galon *et al.*, 2017). A *L. albus* possui capacidade de fitorremediar não só o sulfentrazone, como também a mistura diuron+sulfentrazone (Tabela 2). No entanto, a fitotoxicidade pode ser modulada quando aplicado altas doses e o tipo de molécula.

Alves *et al.* (2019) observaram que a *A. strigosa*, *L. albus* e *R. sativus* são espécies que demonstraram melhor potencial de fitorremediação em áreas onde foi aplicado a dose e o dobro da dose recomendada dos herbicidas, fomesafen e sulfentrazone. A utilização de diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone neste estudo em doses comerciais, na presença do mix de espécies, *A. strigosa*, *L. albus*, *R. sativus*, *F. esculentum*, *L. multiflorum* e *V. sativa* estimulou o aumento da MSPA (Figura 1). Esse efeito pode ocorrer devido à regulação hormonal das plantas, ativação de mecanismos de tolerância ao estresse, além de alterações na fisiologia das plantas pela exposição a herbicidas, influenciando o desenvolvimento e crescimento das espécies, sendo que tais respostas podem variar pela competição por fatores abióticos, disponibilidade de recursos e sensibilidade das espécies, sendo dependente da molécula e dose aplicada (Cornelius *et al.*, 2017; Mancuso *et al.*, 2016; Gonçalves *et al.*, 2018).

Para o *S. cereale* nem um dos tratamentos herbicidas plicados diferiu estatisticamente da testemunha sem herbicidas em relação ao acúmulo de MS. Isso mostra que o *S. cereale* consegue tolerar os herbicidas e não sofrer injúrias e diminuição da MSPA. Destaca-se ainda que o *S. cereale* é uma das coberturas verdes mais utilizadas na Região Sul do Brasil, como planta de cobertura de inverno, pois demonstra elevada relação C/N o que faz com que sua palha demore para ser degradada tendo uma maior proteção do solo contra lixiviação ou evaporação de água. E isso ocasiona um maior controle de plantas daninhas, além do *S. cereale* liberar substâncias alelopáticas que ajudam na diminuição do banco de sementes ou mesmo a inibição da germinação dessas espécies, podendo o agricultor usar menor quantidade de herbicidas na condução das lavouras e com isso se ter menor custo e impacto ambiental (Scavo; Mauromicale, 2021).

As respostas fisiológicas (*A*, *Ci*, *E*, EUA, *gs*) das plantas bioindicadoras *H. annuus* e *S. bicolor* após a fitorremediação das áreas contendo diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone, modulou o desenvolvimento e a produtividade das plantas (Figuras 2 e 3). As espécies de adubo verde além de remediar os solos modificam as características físicas e nutricionais dos solos, o que pode favorecer ou não o desenvolvimento das plantas de produção após o período de fitorremediação ou ainda podem ocasionar diversidade de microrganismos ao solo que tornam mais rápida a degradação dos herbicidas aplicados para o controle de plantas daninhas (Ferreira *et al.*, 2021; Scavo; Mauromicale, 2021; Fonseca *et al.*, 2023).

O uso da mistura de espécies e *L. albus* ocasionou melhor *A* para o *H. annuus* na ausência das moléculas de herbicidas ao solo (Figura 2, Tabela 3). Na presença das

moléculas de herbicida e introdução *S. cereale*, *F. esculentum* e *L. multiflorum* proporcionou maior A , g_s e EUA, as demais plantas promoveram uma redução da A em *H. annuus* acompanhadas pela manutenção g_s , aumento da C_i e redução E (Figura 2, Tabela 3). O sulfentrazone é um inibidor da enzima protoporfirinogênio oxidase (PROTOX), promovendo estresse oxidativo e danos aos pigmentos fotossintéticos, dificultando a captação luminosa e assimilação de CO_2 (Torres *et al.*, 2012; Gehrke; Camargo; Ávila, 2020). Em plantas de *S. bicolor* a A e a EUA foram maiores quando utilizado a mistura das espécies, *Lupinus albus* e sem cobertura para remediação de solo com diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone não diferindo do controle (Tabela 5). As maiores atividades fotossintéticas foram acompanhadas pela manutenção da condutância estomática (g_s), redução da concentração interna de CO_2 (C_i) e da transpiração (E).

Reis *et al.*, (2014), ao avaliarem efeito dos herbicidas inibidores de PROTOX aplicados em pré-emergência do *H. annuus*, não observaram efeitos significativos sobre parâmetros fisiológicos da cultura, indicando tolerância da espécie sobre os herbicidas avaliados. Esse comportamento assemelha-se em partes aos resultados para sulfentrazone e diuron+sulfentrazone, neste estudo. Nas áreas manejadas com *A. strigosa* observou-se redução na E , enquanto com *F. esculentum* um aumento dessa variável em *H. annuus* (Figura 2; Tabela 3).

Esses herbicidas atuam no aparato fotossintético das plantas, o sulfentrazone atuando de forma direta na síntese de clorofila das plantas e o diuron agindo na proteína D_1 (inibidor de FS II). Com isso, esses produtos interferem diretamente na transpiração, podendo reduzir a condutância estomática das plantas pelo fechamento dos estômatos por fatores como água, luz, energia, poluição e também herbicidas (TORRES *et al.*, 2012).

A EUA do *H. annuus* demonstrou os melhores efeitos quando os herbicidas diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone foram fitorremediados pelos adubos verdes (Tabela 3, Tabela 5). Tanto para o *H. annuus* quanto para o *S. bicolor*, que a abertura estomática permite a entrada de CO_2 para ser carboxilado pela enzima ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (RuBisCO) nessas culturas. No entanto, o aumento ou a redução do C_i indica que o CO_2 está sendo acumulado na câmara subestomática ou utilizado pelas plantas com menor concentração, causando limitação ou maior atividade bioquímica para a fotossíntese. A limitação bioquímica pode ocorrer pela redução na atividade e/ou síntese da RuBisCO (Ronchi *et al.*, 2006), visto esta possuir um menor *turnover* em relação às enzimas do ciclo de Calvin (Parry *et al.*, 2008); ou ainda, pela

degradação de enzimas do ciclo de Calvin (Mathur *et al.*, 2014), decorrente do estresse oxidativo (Sharma *et al.*, 2019). Para ambas as culturas bioindicadoras (*H. annuus* ou *S. bicolor*) a modulação fisiológica foi percebida, o que influenciará diretamente na produção, especialmente as variáveis PMG e PG.

A produção de grãos de *H. annuus* foram mais afetadas pelos resultados de remediação do solo do que as plantas de *S. bicolor* (Figura 2, Figura 3, Tabela 4 e Tabela 6). O *F. esculentum*, *R. sativus*, mix de espécies e *S. cereale*, promoveram melhor condicionamento do solo para a produção de PMG do *H. annuus* ao se aplicar o diuron e sulfentrazone e *V. sativa* para o diuron+sulfentrazone (Figura 2, Tabela 4). A inserção de uma cobertura influenciará a cultura subsequente, uma vez que para o *S. bicolor* além do ótimo acondicionamento do solo pelas plantas utilizadas, em *H. annuus* o mix de espécies e *L. albus* favorece a produção do PMG. A presença de diferentes moléculas de herbicidas no solo pode sobrecarregar uma planta, tornando-a potencialmente susceptível ou tolerante, uma vez que os produtos residuais de herbicidas podem ter persistido no solo o que resultou no desencadeamento de algum estresse nas plantas cultivadas, afetando diretamente a produtividade (Gonçalves *et al.*, 2018).

Percebe-se que, tanto no *H. annuus* quanto no *S. bicolor*, há uma modificação na resposta de produção em virtude da inserção de uma determinada planta fitorremediadora. Para uma maior produtividade do *S. bicolor* a utilização de *A. strigosa* na remediação dos herbicidas diuron+sulfentrazone, *L. multiflorum* para o diuron e o mix de espécies ao sulfentrazone. Enquanto para *H. annuus* pode-se utilizar a *A. strigosa* na remediação do diuron+sulfentrazone, *F. esculentum* para o diuron e *L. albus* para sulfentrazone. Uma vez que, as espécies diagnosticadas podem melhorar a atividade biológica e mineral do solo, favorecendo a degradação dos herbicidas (Melo *et al.*, 2019; Dan *et al.*, 2011; Lourencetti *et al.*, 2012; Ferraço *et al.*, 2019) ou mesmo protegendo o solo contra lixiviação e perda de água por evaporação.

Os resultados obtidos com as das espécies de cobertura avaliadas indicam um potencial fitorremediar em solos contaminados com os herbicidas, representando uma estratégia promissora e sustentável a fim de mitigar os efeitos residuais desses compostos sobre culturas sucessoras. Além disso, essas espécies também contribuem para a melhoria das características físicas, químicas e biológicas do solo, refletindo no desempenho das culturas cultivadas em sucessão.

No entanto, a resposta das espécies estudadas varia de acordo com a molécula do herbicida, das condições do solo e bem como a interação com o ambiente, evidenciando

a complexidade dessas interações. Sendo assim, ressalta-se a necessidade de novos estudos para ampliar a compreensão desta dinâmica herbicida-solo-planta-ambiente.

CONCLUSÕES

As espécies de cobertura diferiram quanto ao potencial de fitorremediação e influenciaram o desempenho das culturas em sucessão. *Secale cereale* manteve a produção de massa seca sob todos os tratamentos.

Para *Sorghum bicolor*, destacaram-se *Lolium multiflorum*, o mix de espécies e *Avena strigosa* na remediação de diuron, sulfentrazone e diuron+sulfentrazone, respectivamente. Para *Helianthus annuus*, destacaram-se *Fagopyrum esculentum*, *Lupinus albus* e *Avena strigosa*, na mesma ordem.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, à FAPERGS e à CAPES pelo auxílio financeiro à pesquisa e pelas concessões de bolsas.

REFERÊNCIAS

- AFZAL, M. R.; NAZ, M.; YU, Y.; YAN, L.; WANG, P.; MOHOTTI, J.; HAO, G.; ZHOU, J.J.; CHEN, Z.; ZHANG, L.; WANG, Q. Root exudates: The rhizospheric frontier for advancing sustainable plant protection. **Resources, Environment and Sustainability**, v.21, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2025.100249>
- AGROFIT/MAPA. **Sistemas de Agrotóxicos Fitossanitários** - Consulta Aberta, 2026. Disponível em: www.agrofit.agricultura.gov.br/agrofit.
- ALISTE, M.; ROS, C.; GARRIDO, I.; MARTÍNEZ, C. M.; VERA, A.; SILES, J.; CONTRERAS, F.; FLORES, P.; HELLÍN, P.; FENOLL, J.; BASTIDA, F. Green manure from cover crops enhances pesticide degradation and soil biological health. **Journal of Hazardous Materials**, v. 495, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138984>
- ALVES, C. GALON, L. KAIZER, R. R.; HOLZ, C. M.; WINTER, F. L.; BASSO, F. J. M.; PERIN, G. F.; FORTE, C. T. Selection of species with soil phytoremediation potential after the application of protox-inhibiting herbicides. **Planta Daninha**, v. 36, e. 018174765, 2018a. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582018360100074>
- ALVES, C.; GALON, L.; KAIZER, R. R.; WINTER, F. L.; HOLZ, C. M.; NONEMACHER, F.; SANTIN, C. O. Tolerance of annual winter species to protoporfirinogen oxidase inhibiting herbicides (PROTOX). **Planta Daninha**, v. 36, e. 018174765, 2018b. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582018360100089>
- ALVES, C.; GALON, L.; WINTER, F. L.; BASSO, F. J. M.; HOLZ, C. M.; KAIZER, R. R.; PERIN, G. F. Winter species promote phytoremediation of soil contaminated with protox-inhibiting herbicides. **Planta Daninha**, v. 37, e. 019184783, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582019370100020>
- ARAUJO, G. R.; FERREIRA, G. A. P.; VAZ, V.; LIMA, A. C.; SPOLIDORIO, E. S.; MENDES, K. F. *Canavalia ensiformis* enhances the phytoremediation of remineralized and sulfentrazone-contaminated tropical soils. **Chemosphere**, v. 348, p. 140725, 2024.
- ARYAL, M. Phytoremediation strategies for mitigating environmental toxicants. **Heliyon**, v.10, n. 19, p. e38683, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38683>
- BARROSO, G. M.; SANTOS, E. A.; PIRES, F. R.; GALON, L.; CABRAL, C. M.; SANTOS, J. B. Phytoremediation: A green and low-cost technology to remediate herbicides in the environment. **Chemosphere**, v. 334, p. 138943, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138943>
- BESSEN, M. R.; RIBEIRO, R. H.; BRATTI, F.; LOCATELLI, J. L.; SCHMITT, D. E.; PIVA, J. T. Cover cropping associated with no-tillage system promotes soil carbon sequestration and increases crop yield in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 242, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106162>
- CAMACHO, M. E.; GANNON, T. W.; AHMED, K. A.; MULVANEY, M. J.; HEITMAN, J. L.; AMOOZEGAR, A.; LEON, R.G. Evaluation of imazapic and flumioxazin carryover risk for Carinata (*Brassica carinata*) establishment. **Weed Science**, v. 70, n. 4, p. 503-513, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1017/wsc.2022.27>

- CONCIANI, P. A.; MENDES, K. F.; SOUZA, R. N.; RIBEIRO, A. P.; PIMPINATO, R. F.; TORNISIELO, V. L. Peanut and sorghum are excellent phytoremediators of 14C-tebuthiuron in herbicide contaminated soil. **Advances in Weed Science**, v. 41, 2023. DOI: <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2023;41:00002>
- CORNELIUS, C. D.; BRADLEY, K. W. Carryover of common corn and soybean herbicides to various cover crop species. **Weed Technology**, v. 31, n. 1, p. 21-31, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1614/WT-D-16-00062.1>
- ĆWIELĄG-PIASECKA, I. Soil Organic Matter Composition and pH as Factors Affecting Retention of Carbaryl, Carbofuran and Metolachlor in Soil. **Molecules**, v.28, n.14, p.5552, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28145552>
- DAN, H. A.; DAN, L. G. M.; BARROSO, A. L. L.; PROCOPIO, S. O.; OLIVEIRA JR, R. S.; ASSIS, R. L.; SILVA, A. G.; FELDKIRCHER, C. Atividade residual de herbicidas pré-emergentes aplicados na cultura da soja sobre o milho cultivado em sucessão. **Planta Daninha**, v. 29, n. 2, p. 437-445, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582011000200022>
- DAS, T. K.; BEHERA, B.; NATH, C. P.; GHOSH, S.; SEN, S.; RAJ, R.; GHOSH, S.; SHARMA, A. R.; YADURAJU, N. T.; NALIA, A.; DUTTA, A.; KUMAR, N.; SINGH, R.; PATHAK, H.; SINGH, R. G.; HAZRA, K. K.; GHOSH, P. K.; LAYEK, J.; PATRA, A.; PARAMANIK, B. Herbicides use in crop production: An analysis of cost-benefit, non-target toxicities and environmental risks. **Crop Protection**, v.181, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106691>
- FERRAÇO, M.; BELO, A. F.; PIRES, F. R.; BONONO, R.; FILHO, A. C. Phytoremediation of contaminated soil with sulfentrazone by different density of *Crotalaria juncea*. **Planta daninha**, v. 37, e. 019185323, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582019370100008>
- FERRAÇO, M.; PIRES, F. R.; BELO, A. F.; FILHO, A. C.; BONONO, R. Efeito da densidade populacional de *Canavalia ensiformis* na fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 1, p. 32-40, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170004>
- FERREIRA, L.C.; MOREIRA, B.R.A.; MONTAGNOLLI, R.N.; PRADO, E.P.; VIANA, R.S.; TOMAZ, R.S.; CRUZ, J.M.; BIDOIA, E.D.; FRIAS, Y.A.; LOPES, P.R.M. Green manure species for phytoremediation of soil with tebuthiuron and vinasse. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v.8, p.613642, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.613642>
- FONSECA, W.S.; MARTINS, S.V.; VILLA, P.M. Green manure as an alternative for soil recovery in a bauxite mining environment in southeast Brazil. **Floresta e Ambiente**, v.30, n.1, e20220041, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2023-0041>
- FRANCO, M. H. R.; FRANÇA, A. C.; ALBUQUERQUE, M. T.; SCHIAVON, N. C.; VARGAS, G.N. Fitorremediação de solos contaminados com picloram por *Urochloa Brizantha*. **Agropecuária Tropical**, v. 44, p. 460-467, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000400003>
- GALON, L.; LIMA, A. M.; GUIMARÃES, S.; BELARMINO, J. G.; BURG, G. M.; CONCENÇO, G.; BASTIANI, M. O.; BEUTLER, A. N.; ZANDONA, R. R.;

- RADUNZ, A. L. Potential of plant species for bioremediation of soils applied with imidazolinone herbicides. **Planta Daninha**, v. 32, n. 4, p. 719-726, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582014000400006>
- GALON, L.; NONEMACHER, F.; AGAZZI, L. R.; FIABANE, R. N.; FORTE, C. T.; FRANCHESCHETTI, M. B.; PERIN, G. F. Fitorremediação de solo contaminado com herbicidas inibidores de FSII e de ALS. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 16, n. 4, p. 307-324, 2017. DOI: <https://doi.org/10.7824/rbh.v16i4.586>
- GEHRKE, V. R.; CAMARGO, E. R.; AVILA, L. A. Sulfentrazone: Environmental Dynamics and Selectivity. **Planta Daninha**, v. 38, e020215663, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582020380100032>
- GHOSH, S.; CRIST, K. Modeling volatilization emissions of soil-applied pesticides under agricultural field conditions. **Heliyon**, v. 8, n.12, p. e11810, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11810>
- GONÇALVES, F. A. R.; MELO, C. A. D.; QUEIROZ, P. C.; ENDO, R. T.; SILVA, D. V.; REIS, M. R. Atividade residual de herbicidas nas culturas do milho e da soja. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 61, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.22491/rca.2018.2570>
- HU, F.; AN, J.; SU, A.; WANG, B.; DING, Z.; YAN, X.; WEI, S.; XU, M.; ZHANG, H. Green manure plants enhance atrazine degradation in agriculture soil through modulating rhizosphere microbial communities. **Environmental Research**, v. 265, n.15, p.120478, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120478>
- INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Histórico de dados meteorológicos**, 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>
- KAFLE, A.; TIMILSINA, A.; GAUTAM, A.; ADHIKARI, K.; BHATTARAI, A.; ARYAL, N. Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. **Environmental Advances**, v. 8, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>
- LI, J.; ZHANG, W.; LIN, Z.; HUANG, Y.; BHATT, P.; CHEN, S. Emerging strategies for the bioremediation of the phenylurea herbicide diuron. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 686509, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.686509>
- LIU, Q.; JING, W.; YANG, W.; HUANG, M.; LU, P.; HU, D. Green manure (*Raphanus sativus* L.) alters soil microbial structure and promotes acetochlor degradation. **Arabian Journal of Chemistry**, v.17, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.106017>
- LOURENCETTI, C.; MARCHI, M. R. R.; RIBEIRO, M. L. Influence of sugar cane vinasse on the sorption and degradation of herbicides in soil under controlled conditions. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 47, n. 10, p. 949-958, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/03601234.2012.706562>
- LU, H.; YU, Q.; HAN, H.; OWEN, M. J.; POWLES, S. B. A novel *psbA* mutation (Phe274–Val) confers resistance to PSII herbicides in wild radish (*Raphanus raphanistrum*). **Pest Management Science**, v. 75, n. 1, p. 144-151, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.5079>

- MANCUSO, M. A. C.; AIRES, B. C.; NEGRISOLI, E.; CORRÊA, M. R.; SORATTO, R. P. Seletividade e eficiência de herbicidas no controle de plantas daninhas na cultura do feijão-caupi. **Revista Ceres**, v. 63, n. 1, p. 25-32, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201663010004>
- MATHUR, S.; AGRAWAL, D.; JAJOO, A. Photosynthesis: response to high temperature stress. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 137, p. 116-126, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.01.010>
- MELO, F. M.; MENDONÇA, L. P. C. Avaliação da disponibilidade de fósforo em solo argiloso com diferentes teores de matéria orgânica. **Humanidades e Tecnologia (FINOM)**, v. 18, n. 1, p. 52-67, 2019.
- MESCHEDE, D. K. Avaliação de diferentes coberturas na supressão de plantas daninhas no cerrado. **Planta Daninha**, v. 25, n. 3, p. 465–471, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582007000300005>
- PARRY, M. A. J.; KEYS, A. F.; MADGWICK, P. J.; SILVA, A. E. C.; ANDRALOJC, P. J. Rubisco regulation: a role for inhibitors. **Journal of Experimental Botany**, v. 59, n. 7, p. 1569-1580, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/ern084>
- PASCAL-LORBER, S.; ALSAYEDA, H.; JOUANIN, I.; DEBRAUWER, L.; CANLET, C.; LAURENT, F. Metabolic fate of [14C] diuron and [14C] linuron in wheat (*Triticum aestivum*) and radish (*Raphanus sativus*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 20, p. 10935-10944, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf101937x>
- PEEL, M. C.; FINLAYSON B. L.; MCMAHON T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.11, n. 5, p. 1633-1644, 2007. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- POTT, C. A.; CONRADO, P. M.; RAMPIM, L.; UMBURANAS, R. C.; CONRADO, A. M. C.; OUTEIRO, V. H.; MÜLLER, M. M. L. Mixture of winter cover crops improves soil physical properties under no-tillage system in a subtropical environment. **Soil and Tillage Research**, v.234, p.105854, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105854>.
- REIS, F. C. dos.; MIELKE, K. C.; MENDES, K. F.; SOUSA, R. N. de.; HELUANY, M. H.; TORNISIELO, V. L.; VICTORIA FILHO, R. Diuron, hexazinone, and sulfometuron-methyl applied alone and in mixture in soils: Distribution of extractable residue, bound residue, biodegradation, and mineralization. **Heliyon**, v.9, n.7, e17817, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17817>
- REIS, R. M.; SOUZA, M. F.; QUEIROZ, G. P.; SIEBERT, I. G.; SILVA, D. V.; FERREIRA, E. A.; SILVA, A. A. Tolerância do girassol a herbicidas aplicados em pós-emergência. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 13, n. 1, p. 15-22, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.7824/rbh.v13i1.262>
- ROCHA, P. R. R.; FARIA, A. T.; DA SILVA, G. S.; DE QUEIROZ, M. E. L. R.; GUIMARÃES, F. C. N.; TIRONI, S. P.; GALON, L.; DA SILVA, A. A. Meia-vida do diuron em solos com diferentes atributos físicos e químicos. **Ciência Rural**, v. 43, n. 11, p. 1961-1966, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013001100007>
- RONCHI, C. P.; DAMATTA, F. M.; BATISTA, K. D.; MORAES, G. A. B. K.; LOUREIRO, M. E.; DUCATTI, C. Growth and photosynthetic down-regulation in

- Coffea arabica in response to restricted root volume. **Functional Plant Biology**, v. 33, n. 11, p. 1013-1023, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1071/FP06147>
- SALOMÃO, P. E. A.; FERRO, A. M. S.; RUAS, W. F. Herbicides in Brazil: a brief review. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 2, e32921990, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i2.1990>
- SBCPD - Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas. **Procedimentos para instalação, avaliação e análise de experimentos com herbicidas**. Londrina: SBCPD; 1995.
- SCAVO, A.; MAUROMICALE, G. Crop allelopathy for sustainable weed management in agroecosystems: knowing the present with a view to the future. **Agronomy**, v.11, n.11, p.2104. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11112104>
- SHARMA, A.; KUMAR, V.; THUKRAL, A. K.; BHARDWAJ, R. Responses of plants to pesticide toxicity: an overview. **Planta Daninha**, v. 37, e. 019184291, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582019370100065>
- SIBALEKILE, A.; ARAYA, T.; CASTILLO, J. H.; KOTZÉ, E. Glyphosate-microbial interactions: metagenomic insights and future directions. **Frontiers in Microbiology**, v.16, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1570235>
- SILVA, C.T.; ROJAS-CHAMORRO, J.A.; BARROSO, G.M.; VITORIA SANTOS, M.; EVARISTO, A.B.; GALIANO, E.C.; SANTOS, J.B. Crops with potential for diclosulam remediation and concomitant bioenergy production. **International Journal of Phytoremediation**, v.25, n.3, p.275282, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2074363>
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO - SBCS. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016. 376 p.
- SOUSA, B. T. de; DOMINGUES, A. R.; BALOTTA, G. A. P.; ANDRADE, D. F. M.; DALAZEN, G. Controle de plantas daninhas e seletividade de sulfentrazone + diuron em cana-de-açúcar (cultivar RB 966928). **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 18, n. 4, p. 1-8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.7824/rbh.v18i4.691>
- SOUTO, K. M.; JACQUES, R. J. S.; ZANELLA, R.; MACHADO, S. L. O.; BALBINOT, A.; AVILA, L. A. Fitoestimulação de solo de várzea contaminado com herbicidas imidazolinonas. **International Journal of Phytoremediation**, v. 22, n. 7, p. 774-780, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1710814>
- STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; NASCIMENTO, P. C.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 3.ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2018. 252 p.
- TAKESHITA, V.; MENDES, K. F.; ALONSO, F. G.; TORNISIELO, V. L. Effect of Organic Matter on the Behavior and Control Effectiveness of Herbicides in Soil. **Planta Daninha**, v. 37, p. e019214401, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582019370100110>
- TANDON, S.; PANT, R. Kinetics of diuron under aerobic condition and residue analysis in sugarcane under subtropical field conditions. **Environmental Technology**, v. 40, n. 1, p. 86-93, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1380709>

- TEÓFILO, T. M. S.; MENDES, K. F.; FERNANDES, B. C. C.; OLIVEIRA, F. S.; SILVA, T.S.; TAKESHITA, V.; SOUZA, M. F.; TORNISIELO, V. L.; SILVA, D. V. Phytoextraction of diuron, hexazinone, and sulfometuron-methyl from the soil by green manure species. **Chemosphere**, v. 256, e. 127059, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127059>
- TORRES, L. G.; FERREIRA, E. A.; ROCHA, P. R. R.; FARIA, A. T.; GONÇALVES, V. A.; GALON, L.; SILVA, A. F.; SILVA, A. A. Alterações nas características fisiológicas de cultivares de cana-de-açúcar submetida à aplicação de herbicidas. **Planta Daninha**, v. 30, n. 3, p. 581-587, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582012000300014>
- VASCONCELOS, S. M. A.; JAKELAITIS, A.; COSTA, M. L. M.; OLIVEIRA, R. R. C.; SANTOS, V. S. Seleção de espécies tolerantes para a fitorremediação de solo contaminado com imazapic. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 19, n. 2, p. 149-158, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5965/223811711922020149>
- WANG, R.; YUAN, Y.; YEN, H.; GRIENEISEN, M.; ARNOLD, J.; WANG, D.; WANG, C.; ZHANG, M. A review of pesticide fate and transport simulation at watershed level using SWAT: Current status and research concerns. **Science of The Total Environment**, v.669, p.512-526, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.141>
- WHALEN, D. M.; BISH, M. D.; YOUNG, B. G.; HAGER, A. G.; CONLEY, S. P.; REYNOL, D. B.; STECKEL, L. E.; NORSWORTHY, J. K.; BRADLEY, K. W. Evaluation of cover crop sensitivity to residual herbicides applied in the previous soybean [*Glycine max* (L.) Merr] crop. **Weed Technology**, v. 33, n. 2, p. 312-320, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1017/wet.2019.10>
- ZACCARO-GRUENER, M. L.; NORSWORTHY, J. K.; BRABHAM, C. B.; BARBER, L. T.; BUTTS, T. R.; ROBERTS, T. L.; MAUROMOUSTAKOS, A. Evaluation of dicamba volatilization when mixed with glyphosate using imazethapyr as a tracer. **Journal of Environmental Management**, v. 317, p. 115303, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115303>
- ZAMIGNAN, C. V. F.; LEITE, H. D. S. C.; ALVES, I. V. G.; LIRA, L. A. de.; NETO, O. C. Green manure: sustainable practices for soil conservation and improvement. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 6, n. 1, p. 1-14, 2025. DOI: <https://doi.org/10.61164/rmnm.v6i1.3752>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos em casa-de-vegetação e em condições de campo confirmaram que a fitorremediação com adubos verdes de inverno constitui uma estratégia viável para mitigar a persistência e a fitotoxicidade residual dos herbicidas diuron, sulfentrazone e da mistura composta de diuron+sulfentrazone no solo. Em ambos os capítulos, o diuron apresentou menor persistência residual e menor potencial de injúria às espécies avaliadas, enquanto o sulfentrazone se destacou pela maior toxicidade e maior risco de *carryover*, sendo que a combinação dos produtos resultou em respostas sinérgicas ou aditivas dependentes da espécie de cobertura utilizada.

No primeiro capítulo, conduzido em casa-de-vegetação com pepino como planta bioindicadora, espécies como *Avena strigosa*, *Raphanus sativus*, *Lolium multiflorum*, *Lupinus albus* e o mix de coberturas demonstraram elevada tolerância fisiológica aos herbicidas e capacidade de reduzir a fitotoxicidade em cultura sucessora, evidenciada pela manutenção de trocas gasosas, área foliar e massa seca.

No segundo capítulo, em condição de campo, a utilização dessas espécies, isoladas ou em mistura, em solo tratado com diuron, sulfentrazone ou diuron+sulfentrazone favoreceu a redução de sintomas de intoxicação e permitiu maior desempenho fisiológico e produtivo de *Sorghum bicolor* (sorgo granífero) e *Helianthus annuus* (girassol) cultivados em sucessão, reforçando o potencial dessas coberturas como ferramentas fitorremediadoras em sistemas agrícolas reais.

Os achados desta dissertação têm implicações diretas para a agricultura brasileira, fortemente dependente do uso de herbicidas pré-emergentes e de mistura em sistemas intensivos de produção. A adoção planejada de espécies de cobertura com potencial fitorremediador permite minimizar riscos de *carryover* sobre culturas sensíveis, reduzir a contaminação de solos e águas e preservar a microbiota edáfica, mantendo a eficiência do manejo químico sem comprometer a segurança ambiental. Além disso, o uso de adubos verdes de inverno contribui para a melhoria da estrutura do solo, aumento de matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e sequestro de carbono, integrando a fitorremediação ao contexto mais amplo da agricultura conservacionista e do plantio direto.

Do ponto de vista dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, esta dissertação se alinha principalmente ao ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), ao propor práticas que conciliam controle de plantas daninhas, manutenção de produtividade e redução de impactos ambientais; ao ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), ao

indicar alternativas para o uso mais racional de herbicidas e para a mitigação de seus resíduos em solos agrícolas; e ao ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), ao demonstrar que sistemas com plantas de cobertura e fitorremediação podem aumentar o estoque de carbono no solo e melhorar a resiliência dos agroecossistemas frente a estresses ambientais.

Indiretamente, os resultados também dialogam com o ODS 6 (Água potável e saneamento), na medida em que a redução da lixiviação e da persistência de herbicidas no solo diminui o risco de contaminação de corpos hídricos superficiais e subterrâneos.

Ainda, são trabalhos futuros quantificando diretamente os resíduos de diuron, sulfentrazone e suas misturas em diferentes profundidades e tempos após a aplicação, para se confirmar em nível químico a eficiência fitorremediadora das espécies de cobertura identificadas como mais promissoras.

Também são importantes experimentos que venham a testar os herbicidas em outros tipos de solo, condições climáticas, sistemas de cultivo, diferentes cultivares, bem como estudos que integrem plantas de cobertura com microrganismos degradadores (inoculantes, consórcios microbianos). Além disso pode-se ainda estudar análises econômicas e de ciclo de vida, de modo a avaliar os ganhos produtivos, ambientais e financeiros da adoção da fitorremediação em larga escala na agricultura brasileira.