

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Ciências Agrárias
Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais

Ana Paula Pinheiro Muniz

**USO DE ESPÉCIES ARBÓREAS E ARBUSTIVAS NA FITORREMEDIAÇÃO DE
2,4-D E OXYFLUORFEN**

Montes Claros
2025

Ana Paula Pinheiro Muniz

**USO DE ESPÉCIES ARBÓREAS E ARBUSTIVAS NA FITORREMEDIAÇÃO DE
2,4-D E OXYFLUORFEN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo David Tuffi Santos

Coorientador: Prof. Dr. Evander Alves Ferreira

Montes Claros
2025

Muniz, Ana Paula Pinheiro.

M963u Uso de espécies arbóreas e arbustivas na fitorremediação de 2,4-D e oxyfluorfen
2026 [manuscrito] / Ana Paula Pinheiro Muniz. Montes Claros, 2025.
 46 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Ciências Florestais.
Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador(a): Leonardo David Tuffi Santos.

Banca examinadora: Leonardo David Tuffi Santos, Otávio Cardoso Filho, Luan
Mateus Silva Donato, Maria Nilfa Almeida Neta.

Inclui referências: f. 40-46.

1. Solos - Teses. 2. Fitorremediação - Teses. 3. Solos - Movimento de herbicidas -
Teses. I. Santos, Leonardo David Tuffi. II. Universidade Federal de Minas Gerais.
Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 632.9

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 17 dias do mês de outubro do ano de dois mil e vinte e cinco, às 8:00 horas, sob a Presidência do Professor Leonardo David Tuffi Santos, D. Sc. (Orientador – UFMG/ICA) e com a participação do Professor Otávio Cardoso Filho, D. Sc. (Unimontes), do Técnico em Agropecuária Luan Mateus Silva Donato, D. Sc. (UFMG/ICA) e da Pós-Doutoranda Maria Nilfa Almeida Neta, D. Sc. (UFMG-ICA), reuniu-se, no formato presencial, a Banca de Defesa de Dissertação de **Ana Paula Pinheiro Muniz**, aluna do Curso de Mestrado em Ciências Florestais. Após a avaliação da referida aluna, a Banca Examinadora procedeu à publicação do resultado da defesa da Dissertação intitulada: “**Uso de Espécies Arbóreas e Arbustivas na Fitorremediação de 2,4-D e Oxyfluorfen**”, sendo a aluna considerada **Aprovada**. E, para constar, eu, Professor Leonardo David Tuffi Santos, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: A aluna somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 74 do regulamento do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, conforme apresentado a seguir:

Art. 74 – Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do colegiado do Curso, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros, 17 de outubro de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO DAVID TUFFI SANTOS**
Data: 20/10/2025 10:07:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Leonardo David Tuffi Santos
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **LUAN MATEUS SILVA DONATO**
Data: 20/10/2025 11:33:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luan Mateus Silva Donato
Membro

Documento assinado digitalmente
 **OTAVIO CARDOSO FILHO**
Data: 22/10/2025 09:32:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Otávio Cardoso Filho
Membro

Documento assinado digitalmente
 **MARIA NILFA DE ALMEIDA NETA**
Data: 20/10/2025 12:17:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Maria Nilfa Almeida Neta
Membro

AGRADECIMENTOS

Chegou, enfim, o final de mais uma etapa. Chegar até aqui não teria sido possível se eu sozinha estivesse. Meu agradecimento vai para todos que me incentivaram e estiveram comigo nesta jornada, em especial.

A Deus, por me conceder o dom da vida e pela presença constante em todos os momentos. Por me amparar e fortalecer a cada passo dado, permitindo superar todos os obstáculos encontrados no caminho, os quais me serviram como ensinamento.

Aos meus pais, Antônio José e Antonina, meus primeiros exemplos de vida. Agradeço pela sabedoria nos ensinamentos e pelo investimento em minha educação. Por terem me dado toda a base para que eu conseguisse chegar até aqui. Eu amo vocês, GRATIDÃO!

Aos meus irmãos Lucas, Danilo e Pedro Antônio por acreditarem em mim.

À minha filha, Elisa, luz que Deus enviou para iluminar meus dias: desde a sua chegada, tudo em minha vida ganhou um novo sentido. Obrigada por me mostrar diariamente a importância de nunca desistir. Este trabalho também é seu, porque em cada linha escrita está o reflexo da força que encontrei em você.

Ao meu orientador, Prof. Leonardo Tuffi, pela orientação atenciosa, pelo profissionalismo e pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos. Agradeço por ter me acolhido, pela paciência em cada etapa desta jornada e por acreditar no meu potencial, caminhando ao meu lado para que este trabalho pudesse se concretizar.

Ao Dr. Evander Alves pelo apoio e co-orientação nessa pesquisa, pelas valiosas avaliações e conhecimento compartilhado.

Ao Instituto de Ciências Agrárias (ICA), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), por proporcionar uma formação que vai além da academia.

Aos integrantes do laboratório de Biologia e Manejo de Plantas Daninhas do ICA-UFMG, pela amizade e mão-de-obra sem as quais seria impossível realizar os experimentos que originaram esta dissertação. Em especial, agradeço ao Luan, pela paciência em compartilhar seu conhecimento e pela ajuda em todas as etapas deste trabalho; ao Murilo, Richardson, Nicolle e Gracieme pela amizade e parceria construídas ao longo dessa jornada. Sem vocês, confesso, esta caminhada teria sido muito mais difícil. GRATIDÃO!

RESUMO

A fitorremediação tem ganhado destaque como alternativa viável para recuperar áreas impactadas por compostos tóxicos, incluindo os herbicidas. Uma das limitações da técnica é a seleção de espécies de plantas com capacidade de fitorremediar herbicidas. Os objetivos foram: 1: avaliar a tolerância de dez espécies arbóreas nativas e exóticas aos herbicidas 2,4-D e oxyfluorfen, visando selecionar aquelas com maior potencial para a fitorremediação de áreas contaminadas; 2: avaliar a tolerância de *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* a diferentes doses de 2,4-D e oxyfluorfen. O estudo preliminar para seleção das espécies arbóreas foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 x 10, com quatro repetições, sendo dois herbicidas (2,4-D e oxyfluorfen) combinados com dez espécies arbóreas. As espécies arbóreas testadas foram: *Albizia niopoides*, *Anadenanthera peregrina*, *Cajanus cajan*, *Handroanthus impetiginosus*, *Leucaena leucocephala*, *Moringa oleifera*, *Peltophorum dubium*, *Prosopis juliflora*, *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, *Tithonia diversifolia*. A dose recomendada na bula dos herbicidas foi aplicada aos 28 dias antes da semeadura das espécies arbóreas, sendo avaliados a emergência e o crescimento inicial aos 60 dias após a semeadura. As espécies *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. parahyba* apresentaram maior tolerância ao 2,4-D e ao oxyfluorfen. A partir das espécies previamente selecionadas, foram conduzidos dois experimentos independentes, um para cada herbicida. Os experimentos foram instalados em esquema fatorial 3 x 5, sendo três espécies arbóreas (*C. cajan*, *M. oleifera* e *S. parahyba*) combinadas com diferentes níveis de contaminação de herbicida no solo (0%, 25%, 50%, 75% e 100% da dose recomendada na bula). *Schizolobium parahyba* manteve atividade fisiológica mesmo nas maiores doses de oxyfluorfen, destacando-se como mais promissora para fitorremediação desse herbicida. *Moringa oleifera* apresentou alta sensibilidade ao oxyfluorfen, enquanto *Cajanus cajan* mostrou tolerância ao herbicida com intoxicação baixa e sinais de adaptação. Em contrapartida, no estudo com o herbicida 2,4-D, *C. cajan* foi altamente sensível, com sintomas severos levando à morte das plantas nos primeiros dias. *Moringa oleifera* apresentou efeitos moderados, mas demonstrou capacidade de recuperação fisiológica com o tempo. Em áreas contaminadas com oxyfluorfen ou 2,4-D, recomenda-se o uso das espécies arbóreas *S. parahyba* e *M. oleifera*, respectivamente, para sua descontaminação. Os resultados reforçam o uso da fitorremediação na descontaminação de solos com herbicidas com o uso de espécies arbóreas como *S. parahyba* e *M. oleifera*.

Palavras-chave: adaptação vegetal; descontaminação do solo; recuperação ambiental.

ABSTRACT

Phytoremediation has emerged as a viable alternative for restoring areas impacted by toxic compounds, including herbicides. A major constraint to this technique is the selection of species capable of herbicide phytoremediation. The objectives of this study were: 1 - to evaluate the tolerance of ten native and exotic tree species to the herbicides 2,4-D and oxyfluorfen, in order to select those with greater potential for phytoremediation of contaminated areas; 2 - to assess the tolerance of *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera*, and *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* to different doses of 2,4-D and oxyfluorfen. The preliminary study for species selection was conducted in a completely randomized design, in a 2×10 factorial scheme, with four replications, consisting of two herbicides (2,4-D and oxyfluorfen) combined with ten tree species. The tree species tested were: *Albizia niopoides*, *Anadenanthera peregrina*, *Cajanus cajan*, *Handroanthus impetiginosus*, *Leucaena leucocephala*, *Moringa oleifera*, *Peltophorum dubium*, *Prosopis juliflora*, *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, and *Tithonia diversifolia*. The recommended label dose of the herbicides was applied 28 days before sowing the tree species, and seedling emergence and early growth were evaluated 60 days after sowing. The species *C. cajan*, *M. oleifera*, and *S. parahyba* showed greater tolerance to both 2,4-D and oxyfluorfen. Based on these selected species, two independent experiments were conducted, each using one herbicide. The experiments were arranged in a 3×5 factorial scheme, with three tree species (*C. cajan*, *M. oleifera*, and *S. parahyba*) combined with different levels of soil herbicide contamination (0%, 25%, 50%, 75%, and 100% of the recommended label dose). *S. parahyba* maintained physiological activity even at the highest oxyfluorfen doses, emerging as the most promising species for the phytoremediation of this compound. *M. oleifera* was highly sensitive to oxyfluorfen, whereas *C. cajan* showed tolerance with low phytointoxication and signs of adaptation. Conversely, *C. cajan* was highly sensitive to 2,4-D, exhibiting severe symptoms that led to plant death shortly after emergence. *M. oleifera* showed moderate effects but demonstrated physiological recovery over time. For areas contaminated with oxyfluorfen or 2,4-D, the use of *S. parahyba* and *M. oleifera*, respectively, is recommended. These results support the potential of phytoremediation using forest species for the decontamination of herbicide-impacted soils.

Keywords: environmental recovery; plant adaptation; soil decontamination.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1** – Desenvolvimento das espécies *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* aos 60 dias de cultivo provenientes ao herbicida Oxyfluorfen. (A) Solo não tratado com Oxyfluorfen, (B) 360, (C) 720, (D) 1.080 e (E) 1.440 g i. a. ha⁻¹ de Oxyfluorfen. 27
- Figura 2** – Desenvolvimento das espécies *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* aos 60 dias de cultivo provenientes ao herbicida 2,4-D, (A) Solo não tratado com 2,4-D, (B) 335, (C) 670, (D) 1.005 e (E) 1.314 g e. a. ha⁻¹ de 2,4-D. 28
- Figura 3** – Intoxicação (%) das espécies *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* aos 60 dias de cultivo em solo contaminado com diferentes doses de oxyfluorfen (A) e 2,4-D (B). 29
- Figura 4** – Altura (cm) de plantas de *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* aos 60 dias de cultivo em solo contaminado com diferentes doses de Oxyfluorfen (A) e 2,4-D (B). 30
- Figura 5** – Eficiência de uso da água em *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* aos 60 dias de cultivo em solo contaminado com diferentes doses de Oxyfluorfen. 31
- Figura 6** – (A) Taxa fotossintética, (B) Taxa transpiratória e (C) Taxa de transporte de elétrons de *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* em resposta a diferentes doses do herbicida 2,4-D aplicado no solo. 32
- Figura 7** – Teores de clorofila a (A e C) e clorofila b (B e D) em *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* aos 60 dias sob diferentes doses oxyfluorfen (A e B) e de 2,4-D (C e D). 33
- Figura 8** – Massa seca de raiz (A e C) e de parte aérea (B e D) em *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* sob diferentes doses do herbicida oxyfluorfen (A e B) e 2,4-D (C e D). 34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Espécies arbóreas e arbustivas utilizadas no pré-estudo de tolerância aos herbicidas 2,4-D e Oxyfluorfen.	22
Tabela 2 – Massa seca da parte aérea e massa seca da raiz de diferentes espécies arbóreas e arbustivas, submetidas à aplicação dos herbicidas 2,4-D e Oxyfluorfen, em comparação ao tratamento controle (Test).	26
Tabela 3 – Taxa fotossintética (A- $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Taxa transpiratória (E - $\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Taxa de transporte de elétrons (ETR - $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) de plantas de <i>Cajanus cajan</i> , <i>Moringa oleifera</i> e <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> aos 60 dias de cultivo em solo contaminado com Oxyfluorfen.	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVO GERAL	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
3.1	CONTAMINAÇÕES DE SOLOS POR HERBICIDAS	14
3.2	HERBICIDAS: 2,4-D E OXYFLUORFEN	15
3.3	FITORREMEDIAÇÃO DE HERBICIDA	17
3.4	AVALIAÇÕES MORFOLÓGICAS, AVALIAÇÕES FISIOLÓGICAS E ANÁLISE DE RESÍDUOS DE HERBICIDA	20
4	MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1	ESTUDO PRELIMINAR PARA SELEÇÃO DAS ESPÉCIES ARBÓREAS E ARBUSTIVAS TOLERANTES AO 2,4-D E AO OXYFLUORFEN	22
4.2	AVALIAÇÃO DA FITORREMEDIAÇÃO POR ESPÉCIES TOLERANTES AO 2,4-D E AO OXYFLUORFEN	23
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	25
5	RESULTADOS	26
5.1	ESTUDO PRELIMINAR PARA SELEÇÃO DAS ESPÉCIES ARBÓREAS E ARBUSTIVAS TOLERANTES AO 2,4-D E AO OXYFLUORFEN	26
5.2	AVALIAÇÃO DA FITORREMEDIAÇÃO POR ESPÉCIES TOLERANTES AO 2,4-D E AO OXYFLUORFEN	26
6	DISCUSSÃO	35
7	CONCLUSÕES.....	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A contaminação do solo por compostos químicos representa um dos principais desafios ambientais atuais, afetando diretamente a qualidade dos ecossistemas, dos recursos hídricos e a sustentabilidade da produção agrícola. No Brasil, país em que o setor agropecuário exerce papel fundamental na economia, o uso intensivo de defensivos agrícolas, especialmente herbicidas, tem se consolidado como prática amplamente difundida. Contudo, seu emprego excessivo e, por vezes, inadequado, tem suscitado preocupações crescentes quanto à persistência desses compostos no solo, à bioacumulação e aos possíveis efeitos tóxicos sobre organismos não alvo e sobre a microbiota do solo (Wołejko *et al.*, 2022).

Alguns herbicidas podem apresentar elevada persistência no ambiente, indicando lenta dissipação e potencial de acúmulo no solo. A persistência desses compostos no solo pode alterar suas propriedades químicas e biológicas, reduzindo a diversidade de bactérias e fungos e comprometendo processos essenciais como a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes, o que impacta diretamente a fertilidade e a biodiversidade do solo (Senabio *et al.*, 2024; Douibi *et al.*, 2024). Entre os herbicidas mais utilizados, o 2,4-D e o Oxyfluorfen destacam-se por seu potencial de persistência e mobilidade no solo, características que aumentam os riscos de efeitos residuais e de contaminação de solo, águas subterrâneas e superficiais (Xiong *et al.*, 2025; Mantzos *et al.*, 2014).

Nesse contexto, a fitorremediação tem se destacado como uma alternativa sustentável, economicamente viável e ambientalmente segura para a mitigação da contaminação de solos e águas. Essa técnica baseia-se na capacidade fisiológica e bioquímica de determinadas espécies vegetais de absorver, acumular, transformar ou degradar substâncias tóxicas presentes no ambiente, incluindo metais pesados, compostos orgânicos persistentes e herbicidas (Tarla *et al.*, 2020). Estudos recentes evidenciam que espécies vegetais nativas do Cerrado demonstram sensibilidade reduzida, tolerância múltipla e significativa capacidade de degradação ou acumulação de herbicidas aplicados em sistemas solo-água. Em particular, as árvores testadas, das espécies *Inga marginata*, *Caesalpinia ferrea* e *Schinopsis brasiliensis*, foram capazes de suportar elevados níveis de herbicidas, incluindo moléculas como 2,4-D, Atrazina, Diuron e Hexazinona, evidenciando a eficiência da fitorremediação como ferramenta de descontaminação (Cabral *et al.*, 2023).

A eficiência da fitorremediação está diretamente relacionada à seleção adequada das espécies vegetais, às condições físico-químicas do solo e às propriedades dos poluentes envolvidos. Espécies que apresentam rápido crescimento, elevada produção de biomassa e

tolerância a estresses ambientais são especialmente indicadas, pois favorecem maior absorção e transformação dos contaminantes, potencializando a recuperação das áreas impactadas (Kafle *et al.*, 2022). Nesse sentido, as espécies arbustivas e arbóreas apresentam vantagens adicionais, como sistemas radiculares mais profundos, maior capacidade de adaptação a solos degradados e estabilidade em longo prazo, o que as torna promissoras para a remediação de áreas contaminadas com herbicidas. Diante desse quadro, a adoção de técnicas de fitorremediação surge como resposta integrada à demanda por práticas agrícolas mais sustentáveis, alinhadas aos objetivos de desenvolvimento sustentável, em especial aqueles relacionados à proteção dos recursos hídricos e à saúde dos solos. O presente estudo parte da hipótese de que espécies arbóreas apresentam potencial significativo para reduzir a concentração de 2,4-D e Oxyfluorfen em solos contaminados, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais associados ao uso desses herbicidas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficácia de espécies arbóreas e arbustivas na fitorremediação de solos contaminados com os herbicidas 2,4-D e Oxyfluorfen.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a massa seca da parte aérea e da raiz de dez espécies arbóreas e arbustivas em solo contaminado com resíduos de 2,4-D e Oxyfluorfen.

Determinar a máxima tolerância de diferentes espécies vegetais aos herbicidas 2,4-D e Oxyfluorfen através de análises de intoxicação.

Avaliar parâmetros morfológicos (altura) e fisiológicos (Taxa fotossintética, Taxa transpiratória e Taxa de transporte de elétrons) de *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, submetidas a diferentes doses de 2,4-D e Oxyfluorfen.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 CONTAMINAÇÕES DE SOLOS POR HERBICIDAS

Os herbicidas são substâncias químicas utilizadas no controle de plantas daninhas, sendo fundamentais na produção agrícola convencional, por reduzirem a competição por recursos como água, luz, nutrientes e aumentar a produtividade (Salomão *et al.*, 2020). No Brasil, em função de sua elevada capacidade produtiva agrícola, os herbicidas continuam a representar uma parcela significativa do volume total de agrotóxicos comercializados. Segundo o relatório mais recente do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), os herbicidas foram os ingredientes mais vendidos em 2023 com cerca de 56% do mercado de todos os agrotóxicos comercializados no Brasil (Brasil, 2024). Entre os dez agrotóxicos de maior comercialização no Brasil estão o Glyphosate, 2,4-D e Atrazine, ocupando a primeira, segunda e sexta colocação, respectivamente (Brasil, 2024). O uso intensivo de herbicidas tem gerado preocupações significativas em relação aos impactos ambientais e à ação em organismos não alvo. Além do uso intensivo, é importante compreender o destino desses compostos no ambiente. Os resíduos de herbicidas podem permanecer ativos no solo, afetando plantas subsequentes, comprometendo a germinação e o desenvolvimento das plantas sensíveis e alterando a microbiota local. Em casos de alta mobilidade ou lixiviação, parte dos resíduos pode ainda atingir lençóis freáticos ou corpos d'água superficiais, ampliando os impactos ambientais e representando risco potencial à biota aquática (Passos *et al.*, 2011).

Um dos principais problemas associados ao uso de herbicidas é a contaminação do solo e dos recursos hídricos, já que esses compostos podem persistir no ambiente por longos períodos (Santos *et al.*, 2018). A persistência é o tempo que o produto químico permanece ativo no solo após a aplicação, é influenciada pelos fatores do solo, as condições climáticas e as propriedades herbicidas (Curran, 2016). Santos *et al.* (2006) constataram a presença de resíduos em solo de textura argilo-arenosa até 360 dias após a aplicação de misturas comerciais de herbicidas contendo Picloram em sua formulação. Para 2,4D, a persistência é considerada baixa a moderada: o 2,4-D é degradado em menos de 60 dias na maioria dos solos (Peterson *et al.*, 2017). A dinâmica dos herbicidas no solo depende de fatores como a composição química do produto e as condições do ambiente, e pode resultar em lixiviação para lençóis freáticos ou adsorção às partículas do solo (Medeiros *et al.*, 2024). A persistência desses compostos no solo pode afetar a microbiota local, o que compromete a fertilidade do solo e a biodiversidade em longo prazo. Resíduos persistentes podem reduzir a diversidade de bactérias e fungos ou

provocar alterações na composição da comunidade microbiana, como respiração do solo, hidrolases, nitrificação e outras enzimas. Isso afeta a decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes, com consequências para fertilidade do solo (Senabio *et al.*, 2024; Douibi *et al.*, 2024). Além disso, o processo de lixiviação dos agrotóxicos pode levar à percolação desses compostos através do perfil do solo, atingindo lençóis freáticos e comprometendo a qualidade da água e dos organismos que dela dependem (Pereira *et al.*, 2022). Portanto, embora os herbicidas sejam eficazes no controle de plantas daninhas, seus impactos ambientais não podem ser negligenciados.

Diante desses desafios, tem sido cada vez mais necessário buscar soluções eficazes para reduzir os impactos dos herbicidas no meio ambiente. Entre as alternativas disponíveis, a fitorremediação se destaca como uma abordagem promissora e sustentável (Cabral *et al.*, 2023; Aguiar *et al.*, 2018). Os herbicidas que permanecem no solo por longos períodos devido às suas propriedades químicas e condições ambientais, como alta solubilidade e persistência, podem ser tratados de maneira eficaz por meio da fitorremediação com espécies vegetais (Cabral *et al.*, 2023). Essa prática não apenas reduz os contaminantes a níveis seguros, como também contribui para a restauração da saúde do ecossistema, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis (Barroso *et al.*, 2023).

3.2 HERBICIDAS: 2,4-D E OXYFLUORFEN

O 2,4-D (ácido 2,4-diclorofenoxiacético) foi o primeiro herbicida seletivo desenvolvido para o controle de plantas daninhas; utilizado em escala comercial, trata-se de um herbicida sintético que mimetiza a ação das auxinas naturais, sendo aplicado em pós-emergência e amplamente utilizado no controle de espécies dicotiledôneas (Kelley *et al.*, 2007). O 2,4-D apresenta ação sistêmica, sendo absorvido e translocado pelos tecidos vegetais, e mostra seletividade para culturas de gramíneas, como milho, trigo e arroz (Song *et al.*, 2014). Estudos recentes confirmam que fatores como a temperatura e a umidade são determinantes para acelerar ou retardar o processo de decomposição do 2,4-D no solo (Faji *et al.*, 2022). Aspectos como a textura do solo, a quantidade de matéria orgânica presente e a atividade biológica influenciam diretamente a forma como o 2,4-D se mantém ou se degrada (Marques, 2021). Em solos com maior capacidade de retenção, o herbicida tende a se fixar mais, o que pode aumentar o tempo que ele permanece ativo e, conseqüentemente, o risco de afetar plantas cultivadas posteriormente (Monquero; Silva, 2021). Por outro lado, solos com menor capacidade de retenção podem facilitar a movimentação do produto, diminuindo seu tempo de ação no solo

(Baumgartner *et al.*, 2017). Em experimentos realizados em campo e em casa de vegetação, observou-se que solos tratados com 2,4-D continuaram a afetar plantas indicadoras até alguns dias após a aplicação, evidenciando sua permanência residual e a importância de considerar essas condições para o planejamento de cultivos subsequentes e sistemas de integração lavoura-pecuária (D'Antonino *et al.*, 2009). Embora seja eficaz no controle de plantas daninhas, o uso do 2,4-D requer atenção quanto ao seu potencial de lixiviação e contaminação de recursos hídricos.

O Oxyfluorfen é amplamente reconhecido como um herbicida eficiente no controle de plantas daninhas de folhas largas e algumas gramíneas, atuando principalmente em aplicações de pré-emergência e, em menor grau, de pós-emergência inicial nas culturas de algodão, arroz irrigado, café, cana-de-açúcar, citros, pinus e eucalipto (Agrofit, 2025; Filimon *et al.*, 2021). Esse herbicida pertencente à classe dos éteres difenílicos, cujo mecanismo de ação é a inibição da enzima protoporfirinogênio oxidase (PROTOX), interfere na síntese de clorofila, causando a morte das plantas tratadas (Oliveira *et al.*, 2011). O herbicida Oxyfluorfen demonstra forte afinidade com coloides orgânicos e minerais do solo, o que lhe confere baixa mobilidade e maior resistência à lixiviação (Majid *et al.*, 2024). Essas características, aliadas à sua insolubilidade em água, tornam o Oxyfluorfen persistente em solos com alta carga de matéria orgânica ou textura mais argilosa (Wang *et al.*, 2025). O Oxyfluorfen apresenta uma persistência residual, que pode variar dependendo do tipo de solo e das condições ambientais, chegando a 60 dias de persistência no solo (Mantzos *et al.*, 2014; Pacheco *et al.*, 2022). Essa persistência interfere na sua capacidade de se manter ativo ao longo do tempo após a aplicação, e requer manejo responsável para evitar impactos negativos na microbiota do solo e na dinâmica do ecossistema (Tejada *et al.*, 2022). Segundo Filimon *et al.* (2021), esse herbicida também afeta significativamente as enzimas do solo e as populações microbianas, reforçando a necessidade de uso e monitoramento criterioso.

Compreender as interações do herbicida com os componentes do solo é essencial para reduzir os impactos ambientais adversos associados à sua aplicação (Steffen *et al.*, 2011). A meia-vida constitui o principal parâmetro para estimar a persistência de herbicidas, representando o intervalo de tempo necessário para que ocorra a dissipação de metade da dose originalmente aplicada (Monquero; Silva *et al.*, 2021). A meia-vida para 2,4-D no solo é de sete a 16 dias, enquanto para Oxyfluorfen é de 30 a 40 dias (Monquero; Silva *et al.*, 2021). Meias-vidas longas podem indicar maior risco de contaminação de lençóis freáticos, bioacumulação e efeitos adversos sobre organismos não alvo, enquanto meias-vidas curtas geralmente refletem

maior degradação microbiana ou fotoquímica e, portanto, menor potencial de impacto ambiental.

3.3 FITORREMEDIAÇÃO DE HERBICIDA

A fitorremediação é o processo pelo qual as plantas absorvem, degradam ou acumulam poluentes presentes em solos e águas contaminados (Kafle *et al.*, 2022). Tendo em vista que a remediação se trata de uma abordagem sustentável e eficiente, sua prática tem sido amplamente difundida para tratar solos e águas contaminados com substâncias orgânicas e inorgânicas. Entre os poluentes mais recorrentes estão os metais pesados, compostos radioativos, hidrocarbonetos e agrotóxicos. Os principais mecanismos de fitorremediação compreendem diferentes processos fisiológicos e bioquímicos mediados por plantas (Lamego; Vidal, 2007; Coutinho *et al.*, 2015). Entre eles destacam-se: fitoextração – que consiste na absorção e translocação de contaminantes do solo para os tecidos vegetais (Santos *et al.*, 2021); fitotransformação ou fitodegradação – capacidade de certas plantas metabolizarem compostos tóxicos, tornando-os menos nocivos, que envolve a transformação ou mineralização de compostos orgânicos por meio da ação enzimática vegetal (Morita *et al.*, 2022); fitoestabilização – caracterizada pela imobilização de poluentes na rizosfera, reduzindo sua biodisponibilidade e mobilidade (Guimarães *et al.*, 2024); fitovolatilização – processo em que determinados contaminantes são convertidos em formas voláteis e liberados para a atmosfera pela planta (Guimarães *et al.*, 2024); fitoestimulação ou rizodegradação – na qual exsudatos radiculares promovem a atividade microbiana responsável pela degradação de poluentes (Almeida, 2025); e a rizofiltração – que consiste na remoção de contaminantes da água por adsorção ou absorção nas raízes (Demarco *et al.*, 2024).

A utilização de herbicidas na agricultura frequentemente resulta em resíduos que contaminam o solo e os lençóis freáticos, gerando impactos ambientais significativos (Marques *et al.*, 2011). Nesse contexto, a fitorremediação de herbicidas surge como uma estratégia eficaz, empregando plantas para desintoxicar e recuperar ambientes afetados pela contaminação (Barroso *et al.*, 2023).

Para a fitorremediação ser bem-sucedida é necessário escolher espécies que apresentem tolerância aos herbicidas e capacidade de remoção ou acumulação desses compostos. Essas plantas possuem raízes extensas e eficientes, que podem absorver e acumular contaminantes do solo, transportando-os para suas partes aéreas (Cabral *et al.*, 2023). Características como sistema radicular profundo e volumoso, elevada produção de biomassa, alta taxa de

transpiração, diversidade genética e potencial de associação com microrganismos fixadores de nitrogênio contribuem para o desempenho das plantas na descontaminação do solo (Barroso *et al.*, 2023). Assim como outras estratégias de remediação ambiental, o uso de plantas visa à redução dos teores de contaminantes a níveis considerados seguros para a saúde humana e para o equilíbrio ecológico, ou à contenção da dispersão de substâncias potencialmente tóxicas no meio ambiente (Madalão *et al.*, 2013).

Determinadas espécies florestais apresentam elevada tolerância e capacidade de degradação de herbicidas em águas subterrâneas, evidenciando o potencial da fitorremediação como uma abordagem tecnicamente viável e ecologicamente sustentável para a descontaminação ambiental (Cabral *et al.*, 2023). Além disso, essa técnica possui ampla aceitação social, baixo custo de implantação e manutenção, aplicabilidade em áreas extensas e caráter natural do processo, o que reduz a necessidade de intervenções mecânicas intensivas (Pires *et al.*, 2003). Cabral *et al.* (2023) evidenciam o potencial de espécies vegetais na mitigação de herbicidas, destacando sua aplicabilidade na fitorremediação de áreas impactadas, sendo que as espécies *Inga marginata*, *Caesalpinia ferrea* e *Schinopsis brasiliensis* apresentaram maior tolerância ao herbicida Clomazona, demonstrando potencial para fitorremediação de áreas contaminadas por esse herbicida. Franco *et al.* (2014) preconizaram a capacidade da *Urochloa brizantha* para recuperar solos com diferentes níveis de pH, contaminados com o herbicida Picloram. Os resultados obtidos indicam que essa gramínea possui um potencial significativo para a remediação ambiental, devido à sua habilidade de tolerar ambientes contaminados e possivelmente auxiliar na degradação ou estabilização do herbicida presente no solo. Madalão *et al.* (2013) avaliaram espécies de plantas com potencial para remediação de solos contaminados com o herbicida Sulfentrazone. As plantas de *Crotalaria juncea*, *Canavalia ensiformis* e *Dolichos lablab* apresentaram maior tolerância ao herbicida, sendo indicadas como promissoras para remediação. Experimentos com *Canavalia ensiformis* evidenciam que períodos adequados de cultivo da espécie fitorremediadora são necessários para reduzir a toxicidade do solo a níveis satisfatórios, garantindo que plantas bioindicadoras, como *Pennisetum glaucum*, não sofram efeitos adversos (Madalão *et al.*, 2016).

O tempo requerido para a remediação geralmente é longo, uma vez que depende do ciclo de crescimento e desenvolvimento das plantas. Segundo Pires *et al.* (2003), os principais fatores que influenciam o tempo de tratamento são: espécie e número de plantas; fatores do solo, como textura, estrutura e permeabilidade; composição química do solo e presença de microrganismos; clima local; zona de influência das raízes (rizosfera); tipo e concentração do contaminante; e tamanho e profundidade da área contaminada.

As plantas remediadoras devem ser capazes de tolerar e crescer em solos contaminados com herbicidas e outros poluentes sem apresentar danos significativos. Essa tolerância está relacionada, em parte, à capacidade das plantas de absorver, metabolizar e transformar tais compostos em substâncias menos tóxicas, o que reforça seu potencial para programas de fitorremediação (Cabral *et al.*, 2017). Dessa forma, elas desempenham um papel importante na descontaminação de áreas afetadas. Algumas espécies de plantas remediadoras estabelecem uma relação simbiótica com microrganismos do solo, os quais ajudam na degradação de contaminantes, aumentando a eficiência do processo de remediação (Bento *et al.*, 2012; Oliveira *et al.*, 2021). No entanto, para que essas plantas sejam eficazes, elas devem ser adaptáveis às condições ambientais locais, como tipo de solo, clima e disponibilidade de água, garantindo assim seu crescimento e eficácia na remediação (Khatoon *et al.*, 2024).

Os estudos sobre fitorremediação abrangem uma grande variedade de plantas, que são escolhidas de acordo com o tipo de contaminante e as condições do ambiente. No entanto, grande parte das pesquisas tem focado em plantas cultivadas de crescimento rápido e alta produção de biomassa como feijão-de-porco, milho e cana-de-açúcar, além de plantas de cobertura, como braquiária e milheto (Santos *et al.*, 2006).

As plantas arbóreas e arbustivas fitorremediadoras oferecem diversas vantagens em relação a outras plantas para a remediação de áreas contaminadas. Com maior biomassa, elas conseguem absorver e armazenar uma quantidade mais significativa de contaminantes, suas raízes profundas alcançam camadas do solo que muitas plantas não conseguem atingir, aumentando a eficiência do processo. Seu ciclo de vida longo permite que atuem por períodos mais extensos sem necessidade de replantio constante. Adicionalmente, árvores trazem benefícios para o ecossistema local, como fornecimento de sombra, abrigo para a fauna e melhoria da qualidade do ar, contribuindo de forma ampla para a revitalização ambiental (Cabral *et al.*, 2017). As árvores podem ser usadas em projetos de recuperação de solo ou em faixas de contenção nas bordas de lavouras; em margens de rios ou áreas ripárias contaminadas para ajudar a conter e degradar poluentes transportados por escoamento superficial para cursos de água; serem usadas em aterros sanitários e áreas de disposição de resíduos, para estabilizar o solo e reduzir a lixiviação de contaminantes; por fim, em zonas urbanas contaminadas, em parques ou cinturões verdes, auxiliando na fitorremediação passiva (Heemann *et al.*, 2018; Miranda *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2018).

As análises em estudos de fitorremediação por espécies arbóreas são fundamentais para avaliar a eficiência das plantas em remover, estabilizar ou degradar contaminantes e para compreender os mecanismos fisiológicos e ambientais envolvidos. Essas análises são essenciais

porque permitem avaliar a eficiência, os riscos e os mecanismos da fitorremediação, garantindo que o processo seja seguro e eficaz para o ambiente.

3.4 AVALIAÇÕES MORFOLÓGICAS, AVALIAÇÕES FISIOLÓGICAS E ANÁLISE DE RESÍDUOS DE HERBICIDA

As avaliações morfológicas permitem identificar alterações estruturais que podem indicar níveis de toxicidade ou adaptação ao estresse químico, desempenhando um papel fundamental no estudo dos efeitos de herbicidas em plantas. Essas avaliações morfológicas incluem taxas de crescimento, em características como altura, área foliar, desenvolvimento radicular e massa seca das plantas; taxa de translocação, que é a relação entre contaminante na parte aérea e na raiz; e os sintomas de toxicidade, as quais são essenciais para compreender os impactos dos herbicidas no crescimento e desenvolvimento das fitorremediadoras (Araújo *et al.*, 2024). A observação de alterações morfológicas, como redução do crescimento, deformações foliares ou modificações no sistema radicular, é fundamental para avaliar o impacto direto de herbicidas sobre o desenvolvimento vegetal.

As análises fisiológicas complementam as avaliações morfológicas ao investigarem os processos internos das plantas, como a fotossíntese, transpiração, eficiência no uso da água e a síntese de pigmentos fotossintéticos (Taiz *et al.*, 2017). Essas análises permitem compreender como os herbicidas afetam o metabolismo vegetal e a integridade fisiológica das plantas, fornecendo subsídios para elucidar os mecanismos de estresse, tolerância e adaptação (Aguiar *et al.*, 2016). As respostas fisiológicas das plantas frente a estresses causados pelos herbicidas podem ser quantificadas por meio da avaliação de parâmetros de fluorescência da clorofila, técnica amplamente empregada em estudos de fotossíntese por ser rápida, sensível e não destrutiva. Esse método permite avaliar e quantificar danos ao aparato fotossintético, bem como analisar a eficiência de absorção e utilização da energia luminosa pelo fotossistema II (PSII). Alterações na atividade fotossintética induzidas por herbicidas podem ser detectadas precocemente por meio da fluorescência da clorofila, possibilitando a interpretação dos mecanismos fotossintéticos afetados e a identificação de reduções na capacidade fotossintética antes mesmo da manifestação de sintomas visuais de fitotoxicidade (Král'ová; Jampílek, 2022). Estudos com *Setaria viridis* demonstraram que herbicidas como Clomazone e Saflufenacil causam diminuição do conteúdo de pigmentos, necrose foliar e deformações em cloroplastos, evidenciando a sensibilidade das plantas e fornecendo informações importantes sobre o grau de tolerância ou suscetibilidade das espécies expostas (Cunha Valença *et al.*, 2020).

Os danos ao aparato fotossintético de plantas expostas a herbicidas podem ser avaliados visualmente por meio de sintomas de fitotoxicidade, os quais são expressos em uma escala percentual de 0% a 100%, sendo 0% indicativo da ausência de sintomas visíveis e 100% correspondente à morte completa da planta (Frans *et al.*, 1986).

Aliada às análises morfológicas e fisiológicas, avalia-se a persistência, degradação e disponibilidade do contaminante após o cultivo das plantas fitorremediadoras, por meio de análise química residual. Uma das análises realizadas no solo e na planta é a extração do contaminante e técnicas analíticas, para identificar se houve degradação, imobilização ou fitoextração (Vasconcelo *et al.*, 2020).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ESTUDO PRELIMINAR PARA SELEÇÃO DAS ESPÉCIES ARBÓREAS E ARBUSTIVAS TOLERANTES AO 2,4-D E AO OXYFLUORFEN

Foram selecionadas dez espécies arbóreas e arbustivas, entre nativas e exóticas, para avaliar sua tolerância aos herbicidas e identificar as mais promissoras para a fitorremediação. O experimento foi instalado em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições, em esquema fatorial 3 x 10, com quatro repetições. Os tratamentos foram dois herbicidas (2,4-D e Oxyfluorfen) e a dose zero, combinado com dez espécies arbóreas. Os herbicidas testados e suas respectivas doses foram: 2,4-D (2,0 L ha⁻¹ do produto comercial Aminol[®] 806; 1.340 g e. a ha⁻¹), Oxyfluorfen (2,0 L ha⁻¹ do produto comercial Goal BR[®]; 480 g i. a. ha⁻¹) combinados com dez espécies de plantas:

Tabela 1 – Espécies arbóreas e arbustivas utilizadas no pré-estudo de tolerância aos herbicidas 2,4-D e Oxyfluorfen.

Espécie	Hábito	Origem
<i>Albizia niopoides</i> (Angico-branco)	Arbórea	Nativa do Brasil
<i>Anadenanthera peregrina</i> (Angico-vermelho)	Arbórea	Nativa do Brasil
<i>Peltophorum dubium</i> (Canafistula)	Arbórea	Nativa do Brasil
<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Ipê-roxo)	Arbórea	Nativa do Brasil
<i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> (Paricá)	Arbórea	Nativa do Brasil
<i>Prosopis juliflora</i> (Algaroba)	Arbórea	Exótica (América Central)
<i>Moringa oleifera</i> (Moringa)	Arbórea	Exótica (Índia)
<i>Cajanus cajan</i> (Guandu)	Arbustiva	Exótica (Ásia)
<i>Tithonia diversifolia</i> (Titônia)	Arbustiva	Exótica (América Central)

Fonte: Elaborado pela autora.

O estudo foi realizado em vasos do tipo jardineira, com capacidade de 4 litros, contendo solo argiloso previamente umedecido. Os vasos foram revestidos internamente com sacos plásticos para evitar a passagem de água. As sementes foram adquiridas no mercado local.

A aplicação dos herbicidas foi realizada com um pulverizador costal equipado com ponta de pulverização com indução de ar (modelo TTI 110.02, Jacto, Pompéia, Brasil) e válvula reguladora de pressão (modelo U7466.00, Guarany, Itu, Brasil), constante a 300 KPA, regulado para aplicação de 106 L ha⁻¹ de calda.

Após 28 dias da aplicação (DAA) dos herbicidas, foram semeadas as sementes das dez espécies arbóreas e arbustivas. Para cada espécie, foram usadas 10 sementes por repetição. As sementes foram distribuídas em fileiras na parte central dos vasos. Os vasos foram irrigados duas vezes ao dia para manter o solo próximo da capacidade de campo. As plantas daninhas que surgiram nas parcelas foram retiradas manualmente.

Aos 60 dias após a semeadura, foi realizada a coleta das plantas sobreviventes na parcela; e levadas à estufa de circulação forçada a 65 °C até peso constante, para obtenção da massa seca da parte aérea e a massa seca da raiz.

4.2 AVALIAÇÃO DA FITORREMEDIAÇÃO POR ESPÉCIES TOLERANTES AO 2,4-D E AO OXYFLUORFEN

Com base nos resultados obtidos na etapa de seleção inicial, as espécies *Cajanus cajan* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* apresentaram maior tolerância ao Oxyfluorfen, enquanto *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* e *Moringa oleifera* foram mais tolerantes ao 2,4-D. Essas espécies foram selecionadas para os experimentos de fitorremediação dos herbicidas Oxyfluorfen e 2,4-D.

Nessa etapa, foram realizados dois experimentos independentes, conduzidos com os herbicidas 2,4-D e Oxyfluorfen, respectivamente. Ambos os experimentos foram instalados em delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial $3 \times 5 + 1$, com quatro repetições. O primeiro fator correspondeu às três espécies selecionadas: *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. parahyba* var. *amazonicum*, o segundo fator correspondeu às cinco doses de cada herbicida, e a dose zero de herbicida sendo a testemunha.

No experimento com o herbicida Oxyfluorfen (Goal BR[®]), foram aplicadas as doses de 0; 360; 720; 1080 e 1440 g i. a. ha⁻¹. No experimento com o herbicida 2,4-D (Aminol[®] 806), foram aplicadas as doses de 0; 335; 670; 1005 e 1314 g e. a. ha⁻¹. Para ambos os herbicidas, a dose mais elevada é a prevista na bula dos produtos comerciais para o controle de plantas daninhas sensíveis (Agrofit, 2025).

Nos dois estudos, foram utilizados vasos do tipo jardineira com capacidade de 4 litros, considerados como uma parcela cada vaso. Os vasos foram preenchidos com solo argiloso, cujas características químicas e físicas são: pH em água – 4,54; areia – 12 dag kg⁻¹; silte – 36 dag kg⁻¹; argila – 52 dag kg⁻¹; teor de matéria orgânica – 0,7 dag kg⁻¹; P Mehlich – 1,6 mg dm⁻³; P remanescente – 13,4 mg L⁻¹; K – 56,9 mg dm⁻³; Ca – 2,88 cmolc dm⁻³; Mg – 0,66 cmolc dm⁻³; Al – 1,33 cmolc dm⁻³; H + Al – 3,62 cmolc dm⁻³; SB – 3,69 cmolc dm⁻³; t – 5,02 cmolc dm⁻³; m – 0,0 %; T – 7,30 cmolc dm⁻³; V – 50,47 %.

Inicialmente, o solo previamente umedecido, foi contaminado com os herbicidas, aplicados nas doses recomendadas, conforme os respectivos tratamentos. A aplicação dos herbicidas foi realizada com um pulverizador costal equipado com ponta de pulverização com indução de ar (modelo TTI 110.02, Jacto, Pompéia, Brasil) e válvula reguladora de pressão (modelo U7466.00, Guarany, Itu, Brasil), constante a 300 KPA, regulado para aplicação de 106 L ha⁻¹ de calda.

Aos 5 dias após a aplicação dos herbicidas, procedeu-se à semeadura das espécies *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. parahyba*, em seus respectivos tratamentos, utilizando-se cinco sementes por repetição para cada espécie. Após a semeadura, os vasos foram irrigados duas vezes ao dia, com o objetivo de manter o solo próximo da capacidade de campo.

As avaliações de intoxicação foram realizadas aos 60 dias após a semeadura (DAS) por meio de escala de notas de 0 a 100%, onde 0% corresponde a ausência de sintomas visíveis e 100% a morte da planta (Frans *et al.* 1986). Foram utilizados três avaliadores para darem notas de intoxicação. Os valores por parcela foram determinados pela média aritmética das três observações. Os sintomas de intoxicação foram descritos e fotografados para o devido registro da ação do produto nas plantas de *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. Parahyba*.

A altura das plantas, aos 60 dias, foi medida com o auxílio de régua milimetrada, considerando-se a distância entre a base do caule (nível do solo) e o ápice da parte aérea da planta.

As avaliações fisiológicas, aos 60 dias, foram realizadas por três leituras por planta em folhas completamente expandidas, localizadas no terço médio da copa. Foi avaliado a taxa fotossintética (A), taxa de transpiração (E), eficiência do uso da água (EUA) que foi determinada pela razão entre a taxa fotossintética com a transpiração das plantas, com auxílio de um analisador de gases infravermelho (modelo Lcpro-SD, Analytical Development, Hoddesdon, UK). Os índices de clorofila foliar foram estimados por meio de clorofilômetro portátil (modelo CFL1030, Falker, Porto Alegre, Brasil). A taxa de transporte de elétrons (ETR) e a eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) foram determinadas com o uso de um fluorômetro (modelo PSK, Opti-Sciences, Hudson, USA).

Aos 60 dias, as plantas contidas na parcela foram cortadas rente ao solo e as raízes lavadas em água corrente, separadas e acondicionadas em sacos de papel tipo Kraft. A parte aérea e raízes foram levadas a estufa de circulação forçada a 65°C até peso constante para obtenção da massa seca.

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para o estudo preliminar, foi realizada a média aritmética da massa seca da parte aérea e da raiz das dez espécies arbóreas e arbustivas submetidas à aplicação dos herbicidas 2,4-D e Oxyfluorfen, com auxílio do erro padrão da média.

Os sintomas de intoxicação causado pelo 2,4-D e Oxyfluorfen foram apresentados de forma descritiva para as espécies *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. parahyba*.

Os dados de altura e os dados fisiológicos foram submetidos à ANOVA, com as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. O efeito das doses dos herbicidas foi analisado por meio de análise de regressão escolhendo-se os modelos adequados para representá-los em função do seu comportamento biológico, da significância dos coeficientes do modelo e do valor do coeficiente de determinação (R^2).

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o pacote ExpDes.pt (Ferreira *et al.*, 2014) e o programa estatístico R Studio versão 4.2.3 (R CORE TEAM, 2023).

5 RESULTADOS

5.1 ESTUDO PRELIMINAR PARA SELEÇÃO DAS ESPÉCIES ARBÓREAS E ARBUSTIVAS TOLERANTES AO 2,4-D E AO OXYFLUORFEN

As plantas de *S. parahyba*, *C. cajan* e *M. oleífera* apresentaram maior massa seca da parte aérea acumulada em comparação às demais espécies quando crescidas em solo contaminado com 2,4-D. As três espécies também apresentaram maior massa seca das raízes, com destaque para *C. cajan* (Tabela 2). Em solo contaminado com Oxyfluorfen, as espécies *S. parahyba* e *C. cajan* apresentaram maior acúmulo de massa seca na parte aérea e raízes, mostrando tolerância a esse herbicida. Em solos contaminados com Oxyfluorfen, as espécies *A. niopoides*, *M. oleífera*, *P. juliflora* e *T. diversifolia* foram muito sensíveis ao residual desse herbicida, não sobrevivendo (Tabela 2). Pelas características das espécies *S. parahyba*, *C. cajan* e *M. oleífera*, em resposta à presença de 2,4-D e Oxyfluorfen no solo, seu crescimento da parte aérea e de raízes, as três espécies foram selecionadas para o estudo de fitorremediação.

Tabela 2 – Massa seca da parte aérea e massa seca da raiz de diferentes espécies arbóreas e arbustivas, submetidas à aplicação dos herbicidas 2,4-D e Oxyfluorfen, em comparação ao tratamento controle (Test).

Nome científico	Massa seca da parte aérea			Massa seca da raiz		
	Test	2,4D	Oxy	Test	2,4D	Oxy
<i>Albizia niopoides</i>	0,05±0,02	0,05±0,00	0±0,00	0,03±0,01	0,08±0,02	0±0,00
<i>Anadenanthera peregrina</i>	2,52±0,14	1,17±0,12	0,21±0,04	2,54±0,47	0,89±0,2	0,17±0,07
<i>Cajanus cajan</i>	4,95±0,51	5,04±0,59	1,55±0,49	1,43±0,21	1,32±0,18	0,37±0,09
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	2,15±0,29	2,58±0,07	0,68±0,01	1,20±0,34	1,00±0,11	0,17±0,01
<i>Leucaena leucocephala</i>	1,94±0,14	1,31±0,16	0,31±0,07	1,54±0,19	0,75±0,14	0,11±0,02
<i>Moringa oleífera</i>	3,39±0,57	2,64±0,36	0±0,00	12,48±2,38	3,36±0,55	0±0,00
<i>Peltophorum dubium</i>	1,84±0,32	2,00±0,12	0,87±0,01	0,46±0,05	0,41±0,12	0,2±0,01
<i>Prosopis juliflora</i>	0,65±0,13	1,13±0,06	0±0,00	0,18±0,04	0,22±0,01	0±0,00
<i>Schizolobium parahyba</i>	7,30±1,61	9,84±0,31	5,71±0,64	1,74±0,37	1,88±0,19	1,69±0,26
<i>Tithonia diversifolia</i>	0,26±0,07	0,52±0,27	0±0,00	0,18±0,06	0,15±0,07	0±0,00

± representa o erro padrão da média.

Fonte: elaboração própria.

5.2 AVALIAÇÃO DA FITORREMEDIAÇÃO POR ESPÉCIES TOLERANTES AO 2,4-D E AO OXYFLUORFEN

Durante os 60 dias de observação, as plantas de *S. parahyba* e *C. cajan* se mostraram mais tolerantes ao herbicida Oxyfluorfen, em suas diferentes doses, levando-se em conta

avaliações visuais e notas de intoxicação. Em contrapartida, a *M. oleifera* apresentou sensibilidade já na menor dose testada de oxyfluorfen, levando a morte da mesma (Figura 1).

Figura 1 – Desenvolvimento das espécies *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* aos 60 dias de cultivo provenientes ao herbicida Oxyfluorfen. (A) Solo não tratado com Oxyfluorfen, (B) 360, (C) 720, (D) 1.080 e (E) 1.440 g i. a. ha⁻¹ de Oxyfluorfen.



Fonte: elaboração própria.

As plantas de *S. parahyba* e *M. oleifera* apresentaram maior tolerância à exposição do resíduo de diferentes doses de 2,4-D no solo. Em contrapartida, *C. cajan* apresentou sensibilidade a partir da dose 335 g e. a. ha⁻¹ de 2,4-D, levando à morte das plantas nas doses superiores a 670 g e. a. ha⁻¹ de 2,4-D aplicado ao solo (Figura 2).

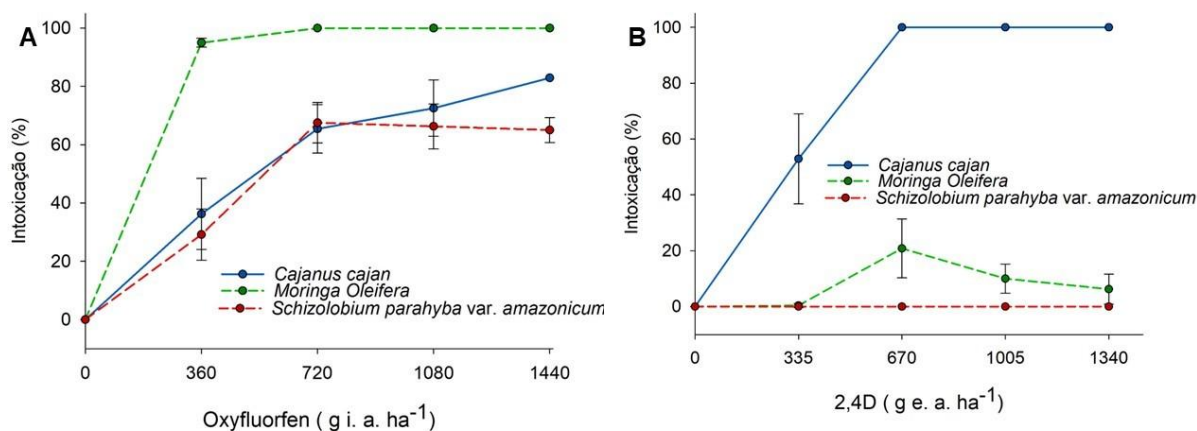
Figura 2 – Desenvolvimento das espécies *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* aos 60 dias de cultivo provenientes ao herbicida 2,4-D, (A) Solo não tratado com 2,4-D, (B) 335, (C) 670, (D) 1.005 e (E) 1.314 g e. a. ha⁻¹ de 2,4-D.



Fonte: elaboração própria.

Aos 60 dias em solo tratado com o herbicida Oxyfluorfen, observou-se que *M. oleifera* mostrou-se altamente sensível em todas as doses, apresentando intoxicação superior a 90% com a morte das plantas nas maiores doses testadas (Figura 3, A). As espécies *C. cajan* e *S. parahyba* apresentaram intoxicação inferior a 80% quando crescidas em solo contaminado com 1440 g i. a. ha⁻¹ de Oxyfluorfen, apresentando certa tendência à tolerância ao herbicida (Figura 3, A). Em solo contaminado com 2,4-D, a espécie *C. cajan* apresentou alta sensibilidade ao herbicida resultando na morte das plantas quando expostas a partir da dose 670 g e. a. ha⁻¹ de 2,4-D. *Moringa oleifera* apresentou 20% de intoxicação na dose de 670 g e. a. ha⁻¹. Enquanto *S. parahyba* foi tolerante ao 2,4-D (Figura 3, B).

Figura 3 – Intoxicação (%) das espécies *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* aos 60 dias de cultivo em solo contaminado com diferentes doses de oxyfluorfen (A) e 2,4-D (B).

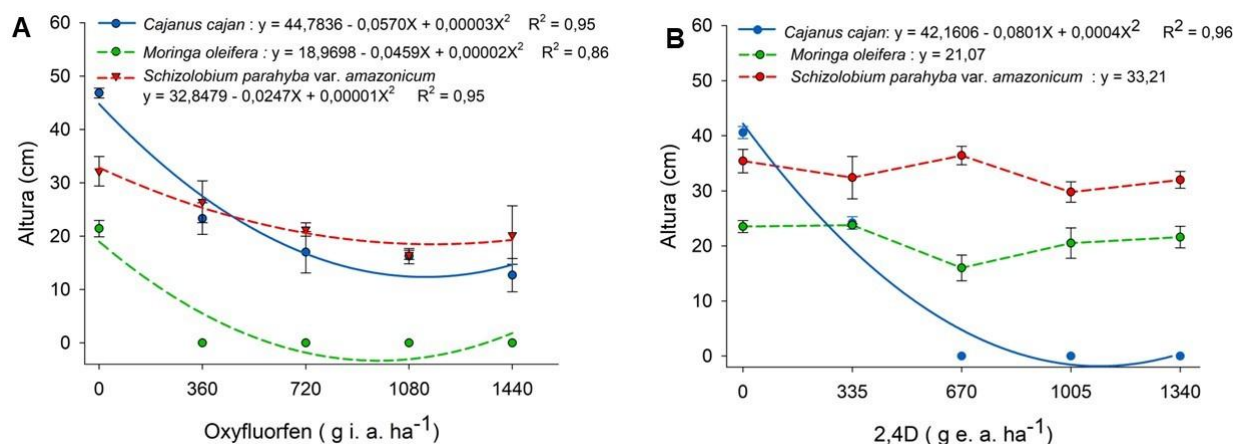


Fonte: elaboração própria.

A altura das plantas de *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. parahyba* foi influenciada pela interação entre espécie x dose de Oxyfluorfen. A altura das plantas apresentou decréscimo com o aumento das doses de Oxyfluorfen, com ajuste quadrático das regressões (Figura 4, A).

No solo contaminado com 2,4-D, a altura das plantas de *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. parahyba* foi influenciada pela interação entre espécie x dose de 2,4-D (Figura 4, B). A espécie *C. cajan* apresentou queda acentuada na altura das plantas já nas primeiras doses de 2,4-D no solo. Por outro lado, *M. oleifera* e *S. parahyba* não apresentaram variação em função das doses de 2,4-D. A espécie *S. amazonicum* apresentou maior altura de plantas em relação as demais espécies em solos contaminados com 2,4-D (Figura 4, B).

Figura 4 – Altura (cm) de plantas de *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* aos 60 dias de cultivo em solo contaminado com diferentes doses de Oxyfluorfen (A) e 2,4-D (B).



Fonte: elaboração própria.

A taxa fotossintética das plantas de *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. parahyba* apresentou efeito significativo ($P \leq 0,05$) para as espécies, não sendo encontrada interação entre espécie x doses de Oxyfluorfen, bem como para o efeito isolado de doses (Tabela 3). *Cajanus cajan* apresentou a maior taxa fotossintética (8,57), diferindo significativamente das demais espécies avaliadas (Tabela 3). A taxa transpiratória das plantas de *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. parahyba* em solo contaminado com o herbicida Oxyfluorfen apresentou diferenças significativas apenas entre as espécies ($P \leq 0,05$), enquanto os efeitos isolados das doses e a interação entre espécie x doses não foram significativos ($P \geq 0,05$) (Tabela 3). *Cajanus cajan* e *S. parahyba* apresentaram maior taxa transpiratória em comparação a *M. oleifera* (Tabela 3). A taxa de transporte de elétrons (ETR) das plantas de *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. Parahyba*, em solo contaminado com Oxyfluorfen, apresentou diferenças significativas apenas entre as espécies ($P \leq 0,05$), com ausência de efeito do fator isolado doses e da interação dose x espécie ($P \geq 0,05$) (Tabela 3). A espécie *C. cajan* apresentou a maior taxa de transporte de elétrons (5,03), enquanto *M. oleifera* apresentou a menor ETR (0,44) (Tabela 3).

Tabela 3 – Taxa fotossintética (A- $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Taxa transpiratória (E - $\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Taxa de transporte de elétrons (ETR - $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) de plantas de *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* aos 60 dias de cultivo em solo contaminado com Oxyfluorfen.

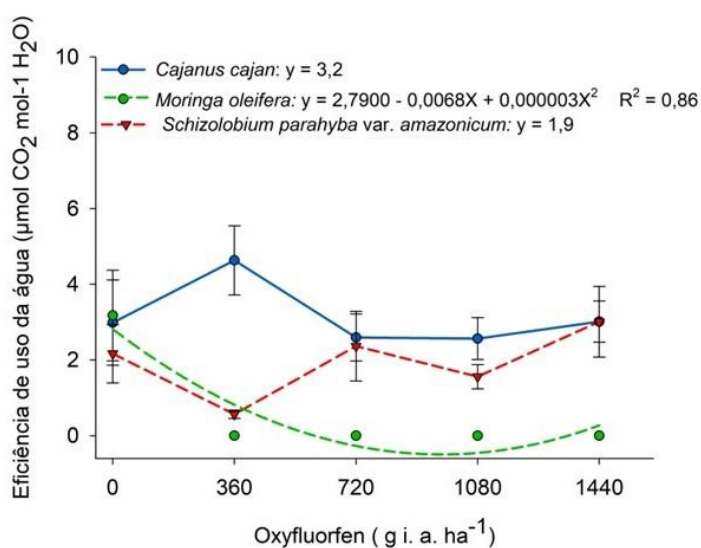
Espécie	A	E	ETR
<i>Cajanus cajan</i>	8,57 a	1,43 a	5,03 a
<i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i>	3,51 b	0,91 a	2,58 b
<i>Moringa oleifera</i>	1,64 b	0,18 b	0,44 c
CV (%)	109,21	34,12	61,8

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

Fonte: elaboração própria.

Em solo contaminado com o herbicida Oxyfluorfen, a eficiência de uso da água (EUA) das plantas de *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. parahyba* foi influenciada pela interação espécie x doses ($P \leq 0,05$) (Figura 5). As espécies *C. cajan* e *S. parahyba* não apresentaram variação em função das doses do herbicida ($P \geq 0,05$). Já *M. oleifera* apresentou decréscimo na EUA com aumento das doses, com ausência de valores em função da morte da planta já com a menor dose do herbicida no solo (Figura 5).

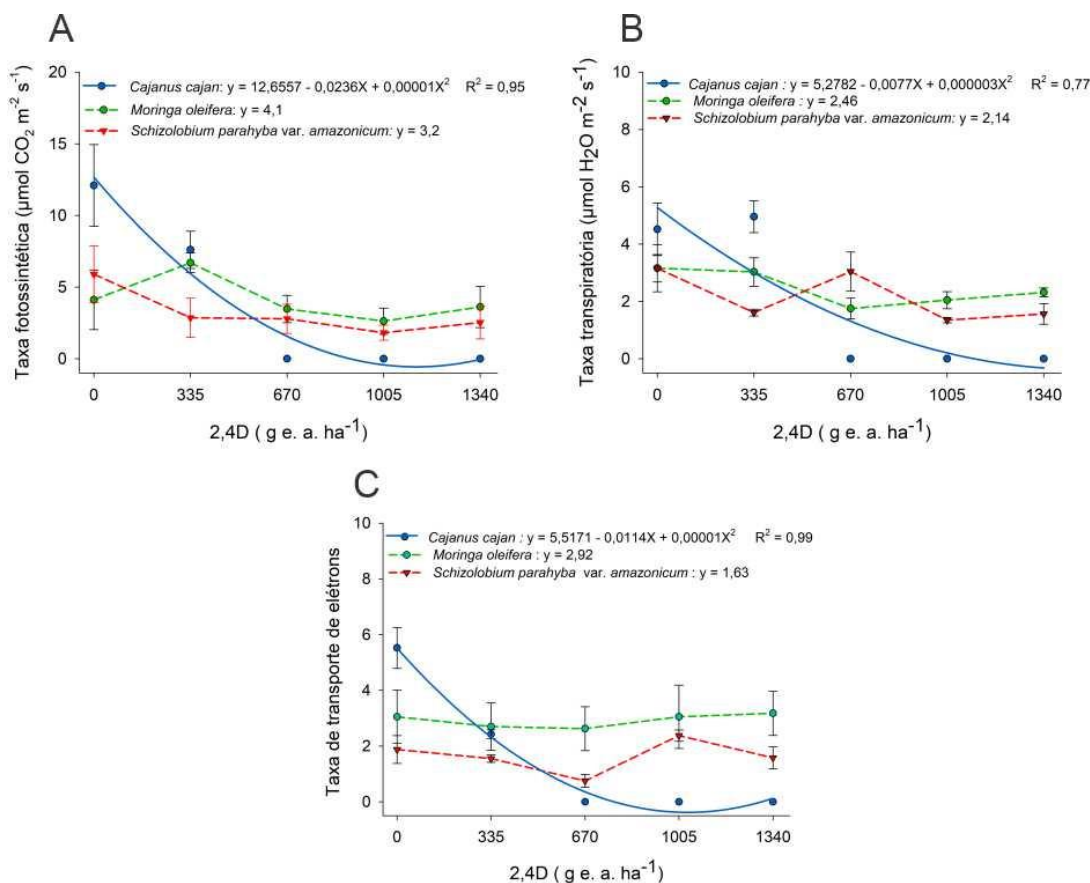
Figura 5 – Eficiência de uso da água em *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* aos 60 dias de cultivo em solo contaminado com diferentes doses de Oxyfluorfen.



Fonte: elaboração própria.

No solo contaminado com 2,4-D, a taxa fotossintética das plantas de *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. parahyba* foi influenciada pela interação entre espécie x dose de 2,4-D ($P \leq 0,05$) (Figura 6, A). A espécie *C. cajan* apresentou redução na taxa fotossintética já nas primeiras doses de 2,4-D no solo; em contrapartida, a *M. oleifera* e *S. parahyba* não apresentaram variação em função das doses de 2,4-D (Figura 6, A). A taxa transpiratória foi influenciada pela interação entre os fatores espécie x doses ($P \leq 0,05$) (Figura 6, B). A taxa transpiratória diminuiu em *C. cajan* com o aumento das doses de 2,4-D, chegando a valores próximos de zero nas maiores concentrações. Em contraste, *M. oleifera* e *S. parahyba* não apresentaram variações na taxa transpiratória em função do aumento das doses (Figura 6, B). Com o herbicida 2,4-D, a taxa de transporte de elétrons (ETR) das plantas de *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. parahyba* apresentou efeito significativo para interação espécie x doses ($P \leq 0,05$) (Figura 6, C). A espécie *C. cajan* apresentou ajuste da regressão quadrática decrescente em função o aumento das doses de 2,4-D (Figura 6, C).

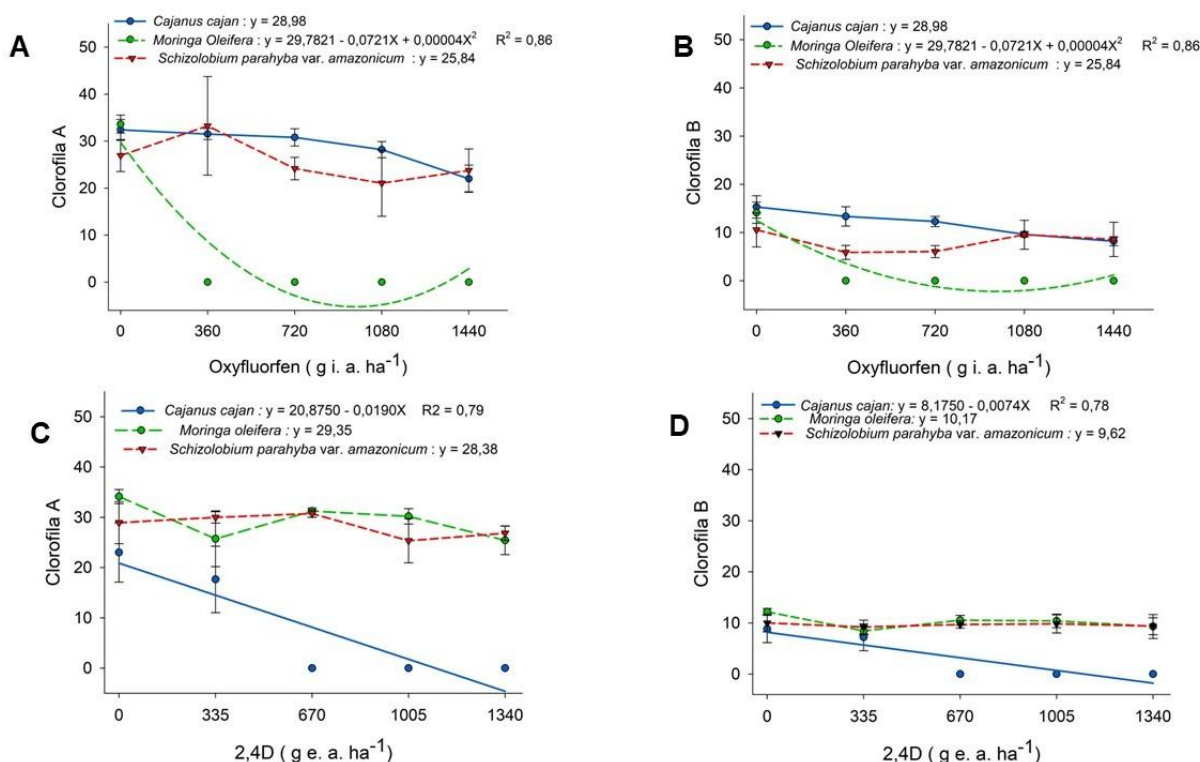
Figura 6 – (A) Taxa fotossintética, (B) Taxa transpiratória e (C) Taxa de transporte de elétrons de *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* em resposta a diferentes doses do herbicida 2,4-D aplicado no solo.



Fonte: elaboração própria.

Em solo contaminado com o herbicida Oxyfluorfen, os índices de clorofila *a* e *b* das plantas de *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. parahyba* apresentaram efeito para interação espécies x doses ($P \leq 0,05$) (Figura 7, A e B). As espécies *C. cajan* e *S. parahyba* não apresentaram variação nos índices de clorofila *a* e *b* em função das doses de Oxyfluorfen. Por outro lado, *M. oleifera*, em função da sua alta sensibilidade ao Oxyfluorfen, apresentou decréscimo nos índices de clorofila *a* e *b* (Figura 7, A e B). Os índices de clorofila *a* e *b* das plantas de *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. parahyba* crescidas em solo contaminado com o herbicida 2,4-D apresentaram efeito para interação entre espécies x doses ($P \leq 0,05$) (Figura 7, C e D). *Cajanus cajan* apresentou sensibilidade ao herbicida, com reduções lineares nos índices de clorofila *a* e *b* em função das doses de 2,4-D presentes no solo. *Moringa oleifera* e *S. parahyba* mantiveram valores estáveis nos índices de clorofila *a* e *b* em função das doses, indicando maior tolerância ao 2,4-D (Figura 7, C e D).

Figura 7 – Teores de clorofila *a* (A e C) e clorofila *b* (B e D) em *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* aos 60 dias sob diferentes doses oxyfluorfen (A e B) e de 2,4-D (C e D).

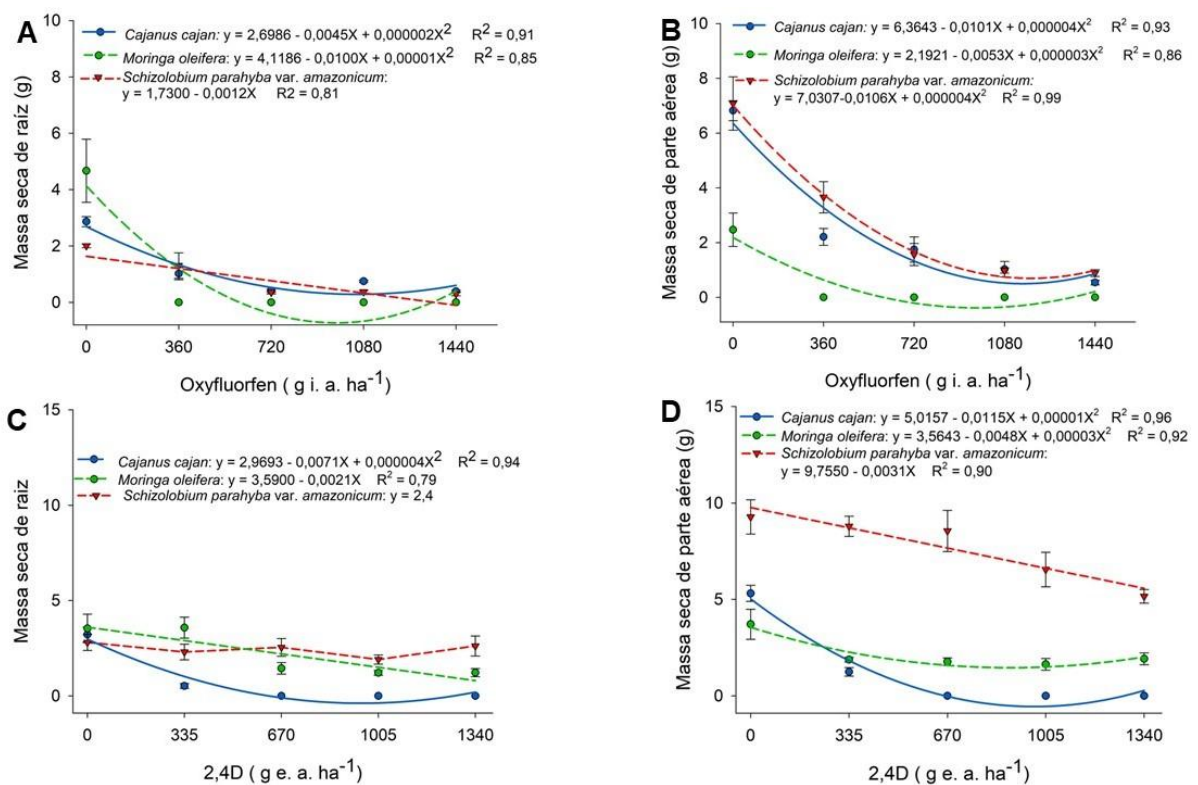


Fonte: elaboração própria.

A massa seca de raízes e da parte aérea de *C. cajan*, *M. oleifera* e *S. parahyba* em solo contaminado com o herbicida Oxyfluorfen e 2,4-D foi afetada pela interação entre espécie x doses dos herbicidas ($P \leq 0,05$) (Figura 8). Todas as espécies demonstraram uma redução da

biomassa da raiz e da parte aérea com o aumento das doses de Oxyfluorfen, sendo *M. oleifera* a mais sensível a esse herbicida (Figura 8, A e B). No solo contaminado com 2,4-D, as três espécies também apresentaram redução na biomassa da parte aérea, sendo *S. parahyba* mais tolerante a esse herbicida, apresentando maiores valores para essa variável (Figura 8, D). A massa seca das raízes de *S. parahyba* não foi afetada pelo aumento das doses de 2,4-D aplicado no solo (Figura 8, C).

Figura 8 – Massa seca de raiz (A e C) e de parte aérea (B e D) em *Cajanus cajan*, *Moringa oleifera* e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* sob diferentes doses do herbicida oxyfluorfen (A e B) e 2,4-D (C e D).



Fonte: elaboração própria.

6 DISCUSSÃO

A contaminação de solos por herbicidas é um dos principais desafios ambientais na agricultura moderna. A contaminação do ambiente por herbicidas é mais grave para produtos com persistência no solo e risco de lixiviação, podendo comprometer a qualidade do solo, da água subterrânea e causar impactos negativos a organismos não alvo, como observado para 2,4-D (Baumgartner *et al.*, 2017) e para o Oxyfluorfen (Tejada *et al.*, 2022). A contaminação de solos por herbicida também limita as atividades agrícolas (Monquero *et al.*, 2021), tornando a descontaminação necessária para fins econômicos e ambientais. Entre as técnicas de remediação de solos contaminados com herbicidas, a fitorremediação surge como uma alternativa promissora por suas características de sustentabilidade e de baixo custo (Barroso *et al.*, 2023).

No presente estudo, entre as dez espécies arbóreas e arbustivas testadas, mostraram-se promissoras como fitorremediadoras as espécies *S. parahyba*, *C. cajan* e *M. oleífera*, pelas suas características de crescimento da parte aérea e de raízes em resposta à presença de 2,4-D e Oxyfluorfen no solo (Tabela 2). As três espécies são da família Fabaceae, importantes na fixação biológica de nitrogênio, na recuperação de solos degradados e de crescimento rápido, quando comparado a outras espécies arbóreas e arbustivas (Oliveira *et al.*, 2021).

A espécie *S. parahyba* possui alta produção de biomassa, boa adaptação em diferentes condições de fertilidade, destacando-se na produção de madeira leve, uma estratégia para restauração ambiental e cultivo comercial (Baldoni *et al.*, 2020). Por sua vez, *C. cajan* possui boa adaptação a ambientes diferentes, alto acúmulo de biomassa, capacidade de fixar nitrogênio contribuindo para a fertilidade do solo (Tulu *et al.*, 2021). *Moringa oleífera* é uma espécie de múltiplos usos econômicos, incluindo alimentação animal, usos na indústria alimentícia e farmacêutica, capacidade de absorção e acumular nutrientes e alguns poluentes do solo, possui um sistema radicular profundo e alta produção de biomassa (Azmi *et al.*, 2025). Os múltiplos usos observados para *S. parahyba*, *C. cajan* e *M. oleífera* reforçam a importância das espécies para fitorremediação de herbicidas.

As plantas de *S. parahyba* destacaram-se pelo maior potencial para fitorremediação de solos contaminados com os herbicidas 2,4-D e Oxyfluorfen, apresentando tolerância aos herbicidas nas diferentes doses (Figura 3). A espécie *M. oleífera* apresentou desempenho intermediário em solo contaminado nas diferentes doses de 2,4-D, enquanto *C. cajan* apresentou tolerância parcial ao Oxyfluorfen (Figura 3). *Schizolobium parahyba* apresentou tolerância ao herbicida 2,4-D, sem sintomas de intoxicação mesmo nas maiores doses testadas

(Figura 3).

As plantas de *S. parahyba* apresentaram maior altura e biomassa da parte aérea nas diferentes condições de contaminação do solo com Oxyfluorfen, quando comparada às demais espécies avaliadas (Figura 4). Essa espécie é de extrema relevância para estudos de aspectos silviculturais. Em solos agrícolas ou em mata nativa, a *S. parahyba* apresenta alta sobrevivência e rápido crescimento inicial de mudas no campo (Matos *et al.*, 2023), importante característica para uso na fitorremediação. Em relação à biomassa, observou-se redução progressiva da massa seca da parte aérea e das raízes em todas as espécies à medida que aumentaram a contaminação do solo com Oxyfluorfen (Figura 8). Contudo, *C. cajan* e *S. parahyba* demonstraram maior tolerância ao Oxyfluorfen. Esse herbicida apresenta meia-vida no solo que pode atingir até 40 dias, além de apresentar forte adsorção em coloides orgânicos e minerais, o que reduz sua lixiviação e aumenta sua persistência no ambiente (Melo *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2025). A persistência do Oxyfluorfen no solo pode variar de 37 a 172 dias (Mantzos *et al.*, 2014), o que aliado à sua elevada toxicidade (Tejada *et al.*, 2022) reforça a importância da fitorremediação de solos contaminados com essa molécula herbicida.

A avaliação das variáveis fisiológicas nas plantas tratadas com o herbicida Oxyfluorfen demonstrou que *C. cajan* apresentou maior taxa fotossintética (Tabela 3) em comparação às demais espécies cultivadas em solo contaminado com Oxyfluorfen. A taxa fotossintética influencia diretamente no crescimento e produção de biomassa da planta, que é essencial para a absorção e translocação de contaminantes e nutrientes; além disso, plantas com fotossíntese eficiente liberam exsudatos radiculares que estimulam a atividade microbiana, contribuindo para a degradação de poluentes no solo (Amado; Chaves Filho, 2015), sendo assim, *M. oleifera* e *S. parahyba* não apresentaram variação em função das doses de 2,4-D, *M. oleifera* apresentou maior taxa fotossintética em relação as demais espécies em solos contaminados com 2,4-D (Tabela 3 e Figura 6).

A taxa fotossintética das plantas e nas variáveis relacionadas ao aproveitamento de CO₂, observadas no presente estudo, estão diretamente relacionadas ao mecanismo de ação desse do Oxyfluorfen. Esse herbicida é um difenil-éter que atua nas plantas sensíveis inibindo a protoporfirinogênio oxidase (PPO) induzindo a formação de espécies reativas de oxigênio (ROS) por meio da interação do oxigênio com a protoporfirina IX, o que leva à inibição da síntese de clorofila (Geoffroy *et al.*, 2003).

Em relação à taxa transpiratória, *S. parahyba* e *C. cajan* exibiram valores superiores quando crescidas em solo contaminado com Oxyfluorfen. Já *M. oleifera* e *S. parahyba* não apresentaram variações na taxa transpiratória em função do aumento das doses de 2,4-D (Tabela

3 e Figura 6). O gradiente gerado pela transpiração exerce efeito determinante na mobilização e no transporte ascendente de poluentes das raízes para parte aérea. Um fluxo transpiratório estável assegura a evaporação contínua da água, favorecendo tanto a translocação de compostos químicos para os tecidos foliares quanto sua liberação pela via estomática (Jia *et al.*, 2025). A taxa transpiratória está diretamente relacionada à eficiência do uso da água (EUA), pois plantas que equilibram a perda de água com a assimilação de CO₂ conseguem crescer de forma eficiente e manter alta capacidade de remoção de contaminantes no solo.

O herbicida 2,4-D apresenta solubilidade em água, o que favorece sua mobilidade no ambiente e contribui para processos de lixiviação no solo. Estudos têm demonstrado que sua distribuição no perfil do solo pode variar de acordo com fatores edafoclimáticos, características do produto e práticas de manejo, resultando em diferenças significativas nos níveis de resíduos detectados após sua aplicação (Baumgartner *et al.*, 2017). Essa capacidade de deslocamento no ambiente está diretamente relacionada ao seu potencial de translocação também nas plantas, uma vez que o 2,4-D se move pelo floema e xilema, acumulando-se preferencialmente em regiões meristemáticas, onde desencadeia efeitos fitotóxicos característicos, esse herbicida causa alteração desregulada do crescimento e do metabolismo das plantas (Sandalio *et al.*, 2016). As espécies *Mabea fistulifera* (Euphorbiaceae) e *Zeyheria tuberculosa* (Bignoniaceae), arbóreas nativas, apresentaram potencial de fitorremediação em áreas contaminadas pelos herbicidas 2,4-D + picloram (Barroso *et al.*, 2022), o que agrega valor aos programas de recuperação ambiental.

Uma espécie indicada para fitorremediação precisa apresentar um sistema radicular bem desenvolvido e eficiente, capaz de absorver e acumular os contaminantes presentes no solo, transportando-os para suas partes aéreas (Cabral *et al.*, 2023). Além disso, características como alta capacidade de retenção de herbicidas pelas raízes, raiz profunda, rápido crescimento, elevada produção de biomassa e eficiente regulação da transpiração contribuem para seu desempenho na descontaminação do solo (Kafle *et al.*, 2022). A fitorremediação em solos adjacentes às matas ciliares configura-se como uma estratégia eficaz e ambientalmente sustentável, alinhada aos princípios da restauração ecológica. Essa prática não apenas promove a redução da carga de contaminantes no solo e na água, mas também favorece a reestruturação da paisagem, o incremento da biodiversidade local e a manutenção dos serviços ecossistêmicos, reforçando o papel das matas ciliares na proteção dos recursos hídricos. Segundo Santos *et al.* (2007) para a implementação de um programa de fitorremediação de áreas contaminadas por herbicidas é necessário a pré-seleção, seleção, confirmação da capacidade de fitorremediação e comprovação de ensaios *in situ*. Esse estudo contribuiu para a identificação e seleção da

Schizolobium parahyba com maior tolerância aos herbicidas 2,4-D e oxyfluorfen e potencial fitorremediador.

7 CONCLUSÕES

As espécies *Schizolobium parahyba*, *Cajanus cajan* e *Moringa oleifera* apresentam maior biomassa acumulada aos 60 dias após a semeadura em comparação às demais espécies arbustivas e arbóreas, seja em solo contaminado ou não com 2,4-D e Oxyfluorfen.

Schizolobium parahyba apresenta maior potencial para fitorremediação de solos contaminados com oxyfluorfen e 2,4-D, apresentando maior tolerância aos herbicidas nas diferentes doses testadas no solo. A espécie *M. oleifera* demonstrou desempenho intermediário em solo contaminado com as diferentes doses do herbicida 2,4-D. Já o *C. cajan* possui tolerância parcial ao oxyfluorfen.

As espécies *M. oleifera* e *C. cajan* não são recomendadas para fitorremediação dos herbicidas oxyfluorfen e 2,4-D, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- AGROFIT. **Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários**. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), c2003. Disponível em: http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 25 de maio de 2025.
- AGUIAR, L. M.; BARBOSA DOS SANTOS, J.; ANTUNES DA COSTA, V.; ALMEIDA BRITO, L.; ALVES FERREIRA, E.; MARINHO PEREIRA, I.; ASPIAZU, I. Herbicide tolerance and water use efficiency in forest species used in degraded areas recovery programs. **Bosque**, Valdivia, v. 37, n. 3, p. 493–500, 2016. DOI: <https://10.4067/S0717-92002016000300006>. Acesso em: 18 de maio de 2025.
- ALMEIDA, C. M. R. Zonas húmidas naturais e construídas como soluções baseadas na natureza. **Revista de Ciência Elementar**, v. 13, n. 1, 2025. DOI: <http://doi.org/10.24927/rce2025.007>. Acesso em: 06 de julho de 2025.
- AMADO, S.; CHAVES FILHO, J. T. Fitorremediação: uma alternativa sustentável para remediação de solos contaminados por metais pesados. **Natureza On-line**, v. 13, n. 4, p. 158-164, 2015.
- ARAÚJO, H. H.; SOARES, G. D. D.; DIAS-PEREIRA, J.; DA SILVA, L. C.; DE MORAIS MACHADO, V. Impact of saflufenacil and glyphosate-based herbicides on the morphoanatomical and development of *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong (Fabaceae): New insights into a non-target tropical tree species. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 51, p. 61254–61269, 2024. DOI: <https://10.1007/s11356-024-35223-4>. Acesso em: 30 de setembro de 2025.
- AZMI, N.; AKANNO, A.; JACOBSEN, C.; FOSSUM, J. O. Moringa Oleifera as a multifunctional bioresource: Nutritional, medicinal and its pickering emulsifying potential. **Food Hydrocolloids for Health**, v. 8, p. 100231, 2025. DOI: <https://10.1016/j.fhfh.2025.100231>. Acesso em: 15 de julho de 2025.
- BALDONI, A. B.; BOTIN, A. A.; TARDIN, F. D.; DE BARROS MARQUES, J. A.; DE OLIVEIRA, F. L.; SILVA, A. J. R.; TEODORO, P. E. Early selection strategies in *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (huber ex ducke) barneby. **Industrial Crops and Products**, v. 152, p. 112538, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112538>. Acesso em: 4 de julho de 2025.
- BARROSO, G. M.; DOS SANTOS, E. A.; PIRES, F. R.; GALON, L.; CABRAL, C. M.; DOS SANTOS, J. B. Phytoremediation: A green and low-cost technology to remediate herbicides in the environment. **Chemosphere**, v. 334, p. 138943, 2023. DOI: <https://10.1016/j.chemosphere.2023.138943>. Acesso em: 10 de maio de 2025.
- BARROSO, G. M.; FERREIRA, M. G.; DOS SANTOS, E. A.; FERREIRA, E. A.; TITON, M.; XAVIER, P. V. S.; SANTOS, J. B. D. *Mabea fistulifera* and *Zeyheria tuberculosa* can be indicated for phytoremediation programs of soils contaminated with hormonal herbicides. **International Journal of Phytoremediation**, v. 24, n. 9, p. 987–994, 2022. DOI: <https://10.1080/15226514.2021.1991267>. Acesso em: 1 de julho de 2025.

BAUMGARTNER, D.; SOUZA, E. G. D.; COELHO, S. R. M.; MAGGI, M. F. Correlation between 2,4-D herbicide residues and soil attributes in southern of Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 3, 2017. DOI: <https://10.5935/1806-6690.20170050>. Acesso em: 15 de julho de 2025.

BENTO, R. A.; SAGGIN-JÚNIOR, O. J.; PITARD, R. M. *et al.* Selection of Leguminous Trees Associated with Symbiont Microorganisms for Phytoremediation of Petroleum-Contaminated Soil. **Water Air Soil Pollut**, v. 223, p. 5659–5671, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1305-3>. Acesso em: 22 de maio de 2025.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Relatórios de comercialização de agrotóxicos**. Brasília, DF: IBAMA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos>. Acesso em: 9 maio 2025.

CABRAL, C. M.; DE FREITAS SOUZA, M.; ALENCAR, B. T. B.; FERREIRA, E. A.; SILVA, D. V.; REGINALDO, L. T. R. T.; DOS SANTOS, J. B. Sensibility, multiple tolerance and degradation capacity of forest species to sequential contamination of herbicides in groundwaters. **Journal of Hazardous Materials**, v. 448, p. 130914, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130914>. Acesso em: 9 de julho de 2025.

CABRAL, C. M.; SANTOS, J. B. dos; FERREIRA, E. A.; MACHADO, V. M.; PEREIRA, I. M.; SILVA, D. V.; SOUZA, M. F. Tolerance to the herbicide clomazone and potential for changes of forest species. **Bioscience Journal**, v. 33, n. 4, p. 897–904, 2017. DOI: <https://10.14393/BJ-v33n4a2017-36750>. Acesso em: 9 de outubro de 2024.

COUTINHO, P. W. R.; CADORIN, D. A.; NORETO, L. M.; GONÇALVES JR, A. C. Alternativas de remediação e descontaminação de solos: biorremediação e fitorremediação. **Nucleus**, v. 12, n. 1, p. 59-68, 2015. DOI: <https://10.3738/1982.2278.1400>. Acesso em: 10 de junho de 2025.

CUNHA VALENÇA, D. D.; DE LELIS, D. C. C.; DE PINHO, C. F.; BEZERRA, A. C. M.; FERREIRA, M. A.; JUNQUEIRA, N. E. G.; DA SILVA, B. O. Changes in leaf blade morphology and anatomy caused by clomazone and saflufenacil in *Setaria viridis*, a model C4 plant. **South African Journal of Botany**, v. 135, p. 365–376, 2020. DOI: <https://10.1016/j.sajb.2020.09.027>. Acesso em: 13 de agosto de 2025.

CURRAN, W. S. Persistence of herbicides in soil. **Crops & Soils**, v. 49, n. 5, p. 16-21, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2134/cs2016-49-0504>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2025.

D'ANTONINO, L.; SILVA, A. A.; FERREIRA, L. R.; CECON, P. R.; QUIRINO, A. L. S.; FREITAS, L. H. L. Efeitos de culturas na persistência de herbicidas auxínicos no solo. **Planta Daninha**, v. 27, n. 2, p. 371–378, 2009. DOI: <https://10.1590/S0100-83582009000200021>. Acesso em: 3 de julho de 2025.

DEMARCO, C. F.; MACHADO, B. R.; PIENIZ, S.; ANDREAZZA, R. Macrófitas aquáticas com potencial de remediação de ambientes aquáticos contaminados. In: **Ecologia e conservação de ecossistemas aquáticos do sul do Brasil**, 2024.

DOUBI, M.; CARPIO, M. J.; RODRÍGUEZ-CRUZ, M. S.; SÁNCHEZ-MARTÍN, M. J.; MARÍN-BENITO, J. M. Changes in soil microbial parameters after herbicide application in soils under conventional tillage and non-tillage. **Processes**, v. 12, n. 4, p. 827, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12040827>. Acesso em: 2 de janeiro de 2025.

FAJI, M.; KEBEDE, G.; FEYISSA, F.; MOHAMMED, K.; MENGISTU, G.; TEREFE, G. Doses and timing of 2, 4-d application for broadleaf weed control, botanical compositions, productivity, and nutritive value of natural pasture. **Advances in Agriculture**, v. 2022, p. 1–10, 2022. DOI: <https://10.1155/2022/6913488>. Acesso em: 24 de novembro de 2024.

FILIMON, M. N.; ROMAN, D. L.; BORDEAN, D. M.; ISVORAN, A. Impact of the herbicide oxyfluorfen on the activities of some enzymes found in soil and on the populations of soil microorganisms. **Agronomy**, v. 11, n. 9, p. 1702, 2021. DOI: <https://10.3390/agronomy11091702>. Acesso em: 10 de agosto de 2025.

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*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 4, p. 460–467, 2014. DOI: <https://10.1590/S1983-40632014000400003>. Acesso em: 4 de novembro de 2024.

FRANS, R. E.; TALBERT, R.; MARX, D.; CROWLEY, H. Experimental design techniques for measuring and analyzing plant responses to weed control practices. In: CAMPER, N. D. (ed.). **Research methods in weed science**. 3. ed. Champaign: Weed Science Society, 1986. p. 29-46.

GEOFFROY, L.; DEWEZ, D.; VERNET, G.; POPOVIC, R. Oxyfluorfen toxic effect on *S. obliquus* evaluated by different photosynthetic and enzymatic biomarkers. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 45, n. 4, p. 445-452, 2003. DOI: <https://10.1007/s00244-003-2217-4>. Acesso em: 13 de setembro de 2025.

GUIMARÃES, A. V.; SILVA, A. V. D.; SILVEIRA, G. D. J. M.; EVANGELISTA, M. L. S.; SANTANA NETO, M. B. D. **Fitorremediação**: o uso da *alyssum serpyllifolium* ssp. *lusitanicum* como solução para solos contaminados com metais pesados. 2024. Trabalho de conclusão de curso (Técnico em Química) – Etec de Mauá, Mauá, 2024.

HEEMANN, T. P.; ARANTES, S.; ANDRADE, E.; VIANA, D.; SELLA, H. Phytoremediation capacity of forest species to herbicides in two types of soils. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 3, e20170465, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.046517>. Acesso em: 1 de junho de 2025.

JIA, F.; SUN, Y.; LIU, X. Comparison of phytoremediation of pesticides by different turfgrass species. **International Turfgrass Society Research Journal**, its2.70095, 2025. DOI: <https://10.1002/its2.70095>. Acesso em: 10 de setembro de 2025.

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, p. 100203, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>. Acesso em: 22 de julho de 2025.

KELLEY, K. B.; RIECHERS, D. E. Recent developments in auxin biology and new opportunities for auxinic herbicide research. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 89, p. 1–11, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2007.04.002>. Acesso em: 18 de novembro de 2024.

KHATOON, Z.; OROZCO-MOSQUEDA, M. D. C.; SANTOYO, G. Microbial contributions to heavy metal phytoremediation in agricultural soils: A review. **Microorganisms**, v. 12, n. 10, p. 1945, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms12101945>. Acesso em: 20 de março de 2025.

KRÁĽOVÁ, K.; JAMPÍLEK, J. Phytoremediation of environmental matrices contaminated with photosystem II-inhibiting herbicides. In: **Pesticides Bioremediation**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 31-80. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-97000-0_2. Acesso em: 5 de março de 2025.

LAMEGO, F. P.; VIDAL, R. A. Fitorremediação: plantas como agentes de despoluição. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 17, n. 1, p. 9-18, 2007.

MADALÃO, J. C.; PIRES, F. R.; CARGNELUTTI FILHO, A.; NASCIMENTO, A. F.; CHAGAS, K.; ARAÚJO, R. S.; BONOMO, R. Susceptibilidade de espécies de plantas com potencial de fitorremediação do herbicida sulfentrazone. **Revista Ceres**, v. 60, n. 1, p. 111–121, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2013000100016>. Acesso em: 15 de julho de 2025.

MADALÃO, J. C.; PIRES, F. R.; NASCIMENTO, A. F.; CHAGAS, K.; FILHO, A. C.; PROCÓPIO, S. D. O. Fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone em função do tempo de cultivo de *Canavalia ensiformis*. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 10, n. 1, p. 36, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v10i1.2762>. Acesso em: 7 de agosto de 2025.

MAJID, S.; AHMAD, K. S.; MALIK, M. A.; KARAMI, A. M. Explorando o destino ambiental do oxifluorfen: afinidade com o solo, persistência, dinâmica de degradação e implicações ecológicas. **Pesquisa Agrícola**, v. 13, n. 4, p. 763-778, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40003-024-00740-8>. Acesso em: 8 de maio de 2025.

MANTZOS, N.; KARAKITSOU, A.; HELA, D.; PATAKIOUTAS, G.; LENETI, E.; KONSTANTINOU, I. Persistence of oxyfluorfen in soil, runoff water, sediment and plants of a sunflower cultivation. **Science of the Total Environment**, v. 472, p. 767-777, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.016>. Acesso em: 10 de agosto de 2025.

MARQUES, G. R. **Avaliação do potencial de lixiviação do herbicida 2, 4-D em colunas de solo através de bioensaios com *Cucumis sativus***. Bagé: Universidade Federal do Pampa, 2021.

MARQUES, M.; AGUIAR, C. R. C.; SILVA, J. J. L. S. D. Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 1–11, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100001>. Acesso em: 12 de junho de 2025.

- MATOS, J. O. R.; DE CINQUE MARIANO, D.; EBLING, Â. A.; DE OLIVEIRA NETO, C. F.; VIÉGAS, I. D. J. M.; OKUMURA, R. S. Crescimento e qualidade de mudas de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* em substratos fertilizados. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 16, n. 3, p. 1-12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2023v16n3e11221>. Acesso em: 12 de março de 2025.
- MEDEIROS, R. D. C. A.; SILVA, T. S.; TEÓFILO, T. M. D. S.; DA SILVA, F. D.; SOUZA, M. D. F.; PASSOS, A. B. R. D. J.; SILVA, D. V. Herbicide leaching in soil with different properties: Perspectives from commercial formulations and analytical standards. **Toxics**, v. 12, n. 3, p. 199, 2024. DOI: <https://10.3390/toxics12030199>. Acesso em: 15 de março de 2025.
- MELO, C. A. D.; MEDEIROS, W. N.; TUFFI SANTOS, L. D.; FERREIRA, F. A.; TIBURCIO, R. A. S.; FERREIRA, L. R. Lixiviação de sulfentrazone, isoxaflutole e oxyfluorfen no perfil de três solos. **Planta Daninha**, v. 28, n. 2, p. 385–392, 2010. DOI: <https://10.1590/S0100-83582010000200018>. Acesso em: 21 de julho de 2025.
- MIRANDA, E. É. V.; PAIM, G. W. Potencial de espécies arbóreas nativas para fitorremediação sob solos de cerrado: revisão bibliográfica. **Revista Cerrados**, v. 21, n. 1, p. 377-398, 2023.
- MONQUERO, P. A.; SILVA, P. D. Comportamento de herbicidas no ambiente. In: **Matologia: estudos sobre plantas daninhas**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 253-294.
- MORITA, A. K. M.; MORENO, F. N. Fitorremediação aplicada a áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, p. 377-384, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210105>. Acesso em: 11 de maio de 2025.
- OLIVEIRA, F. S.; DESTEFANI, J. D.; RIGO, L.; TAVARES, J. C. V. D. P.; CRESPO, A. M.; ARAUJO, O. P.; SOUZA, M. N. Microrganismos simbioses: fixação biológica de nitrogênio e recuperação de pastagens degradadas. In: **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**, v. 2, p. 243-275, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-2-9.c6>. Acesso em: 21 de agosto de 2025.
- OLIVEIRA, R. S. J.; CARNEIRO, J. C.; CONSTANTIN, J.; SANTOS, G.; MARTINI, P. E.; FRANCISCHINI, A. C.; OSIPE, J. B. Aplicações isoladas ou associadas de diuron, oxyfluorfen e prometryne para o controle de *Euphorbia heterophylla*. **Planta Daninha**, v. 29, p. 635-643, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582011000300018>. Acesso em: 20 de janeiro de 2025.
- PACHECO, L. C. P. D. S.; SOUSA, J. E. S. D.; SOUZA, V. S. D.; DAMIN, V. Oxyfluorfen bioavailability in Brazilian Savanna soils. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, e73107, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5273107>. Acesso em: 17 de novembro de 2025.
- PASSOS, A. T. M.; FOLONI, J. S. S.; FAGAN, E. R. Lixiviação no solo de herbicidas em razão da percolação de água. **Científica**, v. 39, n. 1/2, p. 85-93, 2011. DOI: <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2011v39n1/2p85>. Acesso em: 15 de julho de 2025.

PEREIRA, B. D. F. M.; ALVES, B. M.; MEDEIROS, M. P.; PEREIRA, R. M. Contaminação no lençol freático, rios, lagos e lagoas do Brasil por agrotóxicos. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 8, n. 7, p. 863-874, 2022. DOI: <https://doi.org/10.51891/rease.v8i7.6235>. Acesso em: 26 de maio de 2025.

PETERSON, M. A.; MCMASTER, S. A.; RIECHERS, D. E.; SKELTON, J.; STAHLMAN, P. W. 2, 4-D past, present, and future: a review. **Weed Technology**, v. 30, n. 2, p. 303-345, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1614/WT-D-15-00131.1>. Acesso em: 6 de maio de 2025.

PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; SILVA, A. A.; PROCÓPIO, S. O.; FERREIRA, L. R. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, v. 21, n. 2, p. 335–341, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582003000200020>. Acesso em: 17 de agosto de 2025.

SALOMÃO, P. E. A.; FERRO, A. M. S.; RUAS, W. F. Herbicidas no Brasil: uma breve revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 2, e32921990, 2020. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i2.1990>. Acesso em: 7 de julho de 2025.

SANTOS, J. B.; SILVA, A. A.; PROCÓPIO, S. O.; FERREIRA, L. R.; PIRES, F. R. Fitorremediação de áreas contaminadas por herbicidas. *In: Tópicos em Manejo de Plantas Daninhas*. Viçosa: Editora UFV, 2007. v. 1, p. 249–278.

SANTOS, J. S.; SILVA, T. T. S.; ALMEIDA, B. G. Fitoextração de metais pesados em solo contaminado com composto de resíduo urbano e água residuária. *In: Ciências agrárias: uma jornada científica e tecnológica*. [S.l.: s.n.], v. 2, p. 95-107, 2021. DOI: <https://doi.org/10.29327/530817.2-10>. Acesso em: 15 de julho de 2025.

SANTOS, M. V.; FREITAS, F. A.; FERREIRA, L. R.; SANTOS, L. D. T.; TUFFI SANTOS, L. D.; VIANA, R. G. Eficácia e persistência no solo de herbicidas utilizados em pastagem. **Planta Daninha**, v. 24, n. 2, p. 391-398, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582006000200024>. Acesso em: 8 de julho de 2025.

SANTOS, N. M. C.; DA COSTA, V. A. M.; DE ARAÚJO, F. V.; ALENCAR, B. T. B.; RIBEIRO, V. H. V.; OKUMURA, F.; DOS SANTOS, J. B. Phytoremediation of Brazilian tree species in soils contaminated by herbicides. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 27, p. 27561-27568, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2798-0>. Acesso em: 9 de maio de 2025.

SENABIO, J. A.; CORREIA DA SILVA, R.; GUARIZ PINHEIRO, D.; GOMES DE VASCONCELOS, L.; SOARES, M. A. The pesticides carbofuran and picloram alter the diversity and abundance of soil microbial communities. **PLOS ONE**, v. 19, n. 11, e0314492, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314492>. Acesso em: 1 de março de 2025.

SONG, Y. Insight into the mode of action of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) as an herbicide. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 56, n. 2, p. 106–113, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/jipb.12131>. Acesso em: 7 de setembro de 2025.

STEFFEN, G. P. K.; STEFFEN, R. B.; ANTONIOLLI, Z. I. Contaminação do solo e da água pelo uso de agrotóxicos. **Tecnológica**, v. 15, n. 1, p. 15-21, 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TARLA, D. N.; ERICKSON, L. E.; HETTIARACHCHI, G. M.; AMADI, S. I.; GALKADUWA, M.; DAVIS, L. C.; 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>. Acesso em: 15 de julho de 2025.

TEJADA, M.; MACIAS-BENITEZ, S.; CABALLERO, P.; GÓMEZ, I.; PANEQUE, P.; PARRADO, J. Bioremediation of an oxyfluorfen-polluted soil using biostimulants obtained by fermentation processes: Effect on biological properties. **Applied Soil Ecology**, v. 170, p. 104270, 2022. DOI: <https://10.1016/j.apsoil.2021.104270>. Acesso em: 12 de março de 2025.

TULU, A.; DIRIBSA, M.; FEKEDE, G.; TEMESGEN, W.; KEBE, W.; KUMSA, A. Comparative evaluations of selected pigeon pea (*Cajanus cajan*) genotypes for biomass yield, nutrient composition, and dry matter intake under diverse locations of tropical africa. **Advances in Agriculture**, v. 2021, p. 1–5, 2021. DOI: <https://10.1155/2021/5516662>. Acesso em: 8 de maio de 2025.

VASCONCELO, S. M. A.; SANTOS, V. S.; OLIVEIRA, V. F.; COSTA, M. L. M.; JAKELAITIS, A. Fitorremediação de solo contaminado com imazapic. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 6, e4641, 2024.

WANG, L.; XIE, C.; SUI, J.; YANG, J.; ZHOU, Y.; WANG, T.; ZHANG, W. Microbial degradation of diphenyl ether herbicides past, present and future. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 13, n. 3, p. 116357, 2025. DOI: <https://10.1016/j.jece.2025.116357>. Acesso em: 15 de setembro de 2025.

WOŁEJKO, E.; WYDRO, U.; ODZIEJEWICZ, J. I.; KORONKIEWICZ, A.; JABŁOŃSKA-TRYPUĆ, A. Biomonitoring of soil contaminated with herbicides. **Water**, v. 14, n. 10, p. 1534, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14101534>. Acesso em: 15 de julho de 2025.

XIONG, J.; LIANG, Y.; YUAN, C.; CHEN, S.; WEN, M.; WANG, W.; YU, Y. Application of multi-dimensional isotope fractionation to characterize the biotic and abiotic transformation mechanisms of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid. **Journal of Hazardous Materials**, v. 498, p. 139885, 2025. DOI: <https://10.1016/j.jhazmat.2025.139885>. Acesso em: 12 de setembro de 2025.