BIOATIVIDADE DE MOLÉCULAS SEMISSINTÉTICAS FME E TMET DURANTE O ESTABELECIMENTO INICIAL DE *Lactuca sativa* E *Sorghum bicolor*

Isabela Vitória Miranda Santos Belisário[1]; Maria Eliza Soares Queiróz[1]; Artur Campos de Oliveira[1], João Paulo de Morais Oliveira[1], Jorge Luiz Pereira[2]; Patrícia Fontes Pinheiro[2], Milene Miranda Praça Fontes[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde - CCENS, Alegre, ES, Brasil. isabelavitoriamsb@gmail.com , mariaelizasqueiroz@gmail.com camposdeoliveira.artur@gmail.com, joaopaulo.ueg@gmail.com, milenemiranda@yahoo.com.br
[2] Departamento de Química (DEQ), Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG, Brasil. jorge.pereira@ufv.br , patricia.pinheiro@ufv.br

Resumo
O uso intensivo de herbicidas sintéticos no manejo de plantas daninhas tem gerado impactos ambientais e favorecido a seleção de populações resistentes, impulsionando a busca por bioherbicidas alternativos. Este trabalho teve como objetivo avaliar a atividade fitotóxica dos ésteres semissintéticos fenoxiacetato de metila (FME) e timoxiacetato de metila (TMET), derivados dos ácidos fenoxiacético e timoxiacético, sobre a germinação e o desenvolvimento inicial de *Lactuca sativa* (dicotiledônea) e *Sorghum bicolor* (monocotiledônea). Os bioensaios foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado, com sementes expostas a soluções de FME e TMET nas concentrações de 0,5, 1,0 e 2,0 mmol L^{-1}, utilizando água destilada e Tween 20 como controles negativos e o herbicida 2,4-D como controle positivo. Foram avaliados o Índice de Velocidade de Germinação (IVG), a Porcentagem de Germinação (PG), o Comprimento Radicular (CR) e o Comprimento da Parte Aérea (CA). Ambos os compostos apresentaram fitotoxicidade, com inibição total da germinação e do crescimento na concentração de 2,0 mmol L^{-1}, estatisticamente equivalente ao 2,4-D. O crescimento radicular foi o parâmetro mais sensível, e o FME exibiu maior persistência da atividade inibitória do que o TMET nas concentrações intermediárias e baixas, especialmente em *L. sativa*. Conclui-se que os ésteres FME e TMET possuem potencial fitotóxico expressivo, com perfil de seletividade comparável a herbicidas auxínicos sintéticos, reforçando seu potencial como candidatos a herbicidas.

Palavras-chave: Crescimento radicular. Ésteres bioativos. Fitotoxicidade. Herbicidas auxínicos. Seletividade vegetal.

Área do Conhecimento: Ciências Biológicas.

Introdução

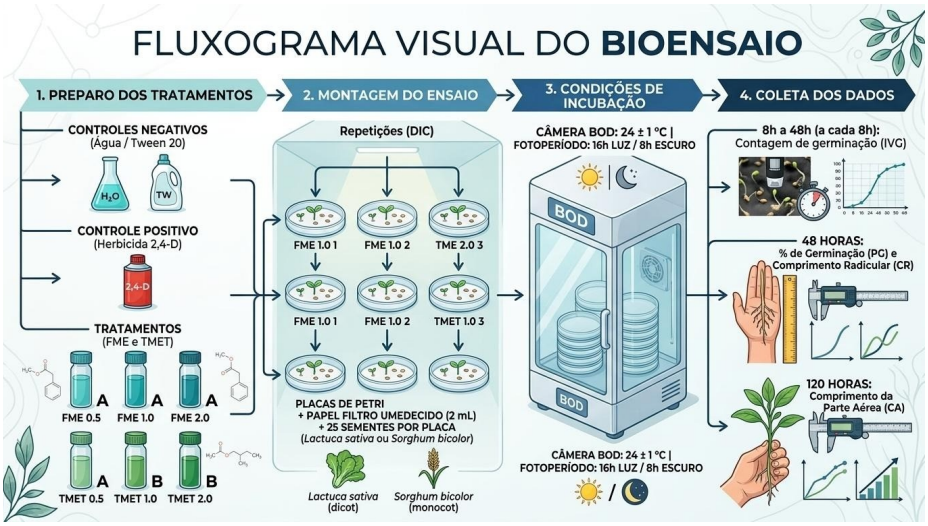
O manejo de plantas daninhas em sistemas de monocultura depende fortemente do uso de herbicidas sintéticos, como o ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), herbicida auxínico desenvolvido na década de 1940 que atua por meio da mimetização da ação hormonal da auxina. O uso intensivo e contínuo desses insumos, no entanto, tem sido associado a impactos ambientais, contaminação de solos e recursos hídricos e à rápida seleção de populações de plantas infestantes resistentes a múltiplos mecanismos de ação, o que reforça a necessidade de alternativas mais sustentáveis, como as incentivadas pelo Programa Nacional de Redução de Agrotóxicos (PRONARA), instituído pelo Decreto nº 12.538/2025.

Nesse contexto, compostos de origem natural e seus derivados semissintéticos destacam-se como alvos promissores para prospecção de novas moléculas bioativas com potencial herbicida. O fenol e o timol servem como precursores dos ácidos fenoxiacético e timoxiacético, cuja esterificação origina, respectivamente, o fenoxiacetato de metila (FME) e o timoxiacetato de metila (TMET). Embora pertençam à mesma classe química, o TMET apresenta substituintes metil e isopropil no anel aromático oriundos do timol, enquanto o FME possui anel aromático não substituído, diferença estrutural que

pode alterar a lipofilicidade e o impedimento estérico das moléculas e, consequentemente, sua absorção e interação com os tecidos vegetais.

Estudos anteriores indicam que derivados dos ácidos fenoxiacético e timoxiacético podem afetar a germinação e o desenvolvimento inicial de espécies vegetais, com efeito seletivo semelhante ao do 2,4-D (Alves *et al.*, 2018; Roberto *et al.*, 2023; Pinheiro *et al.*, 2024). Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar e comparar a atividade fitotóxica dos ésteres semissintéticos FME e TMET sobre a germinação e o desenvolvimento inicial das espécies-modelo *Lactuca sativa* (dicotiledônea) e *Sorghum bicolor* (monocotiledônea).

Figura 1 – Fluxograma esquemático das etapas do bioensaio de fitotoxicidade dos ésteres semissintéticos (FME e TMET) sobre *Lactuca sativa* e *Sorghum bicolor*.



Fonte: Gemini (2026), gerado por inteligência artificial a partir dos dados experimentais do estudo da autora, Isabela Vitória.

Metodologia

Os compostos FME e TMET, ésteres metílicos dos ácidos fenoxiacético e timoxiacético, respectivamente, foram obtidos em colaboração com o Departamento de Química da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Foram utilizadas sementes de *Lactuca sativa* L. (cultivar Elba, lote 110948, 90% de germinação) e *Sorghum bicolor* (L.) Moench (cultivar AL Precioso, lote ALAL013/25, 75% de germinação).

Os ensaios de fitotoxicidade foram conduzidos em placas de Petri higienizadas com álcool 70% e forradas com papel-filtro umedecido com 2 mL das soluções-teste de FME e TMET, nas concentrações de 0,5, 1,0 e 2,0 mmol L^{-1}. Como controles negativos utilizaram-se água destilada e solução de Tween 20 (2% p/v), veículo emulsificante para solubilização dos compostos; como controle positivo utilizou-se o herbicida 2,4-D. Em cada placa foram distribuídas 25 sementes, com três repetições por tratamento, em delineamento inteiramente casualizado (DIC), mantidas em incubadora BOD a 24 ± 1 °C e fotoperíodo de 16h luz / 8h escuro.

A avaliação da germinação foi realizada entre 8 e 48 horas após a instalação do experimento, com leituras a cada 8 horas, calculando-se o Índice de Velocidade de Germinação (IVG) segundo Maguire (1962). A Porcentagem de Germinação (PG) e o Comprimento Radicular (CR) foram determinados às 48 horas, e o Comprimento da Parte Aérea (CA) às 120 horas, com auxílio de paquímetro digital.

Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett para verificação de normalidade e homogeneidade de variâncias. Atendidos os pressupostos, realizou-se ANOVA seguida

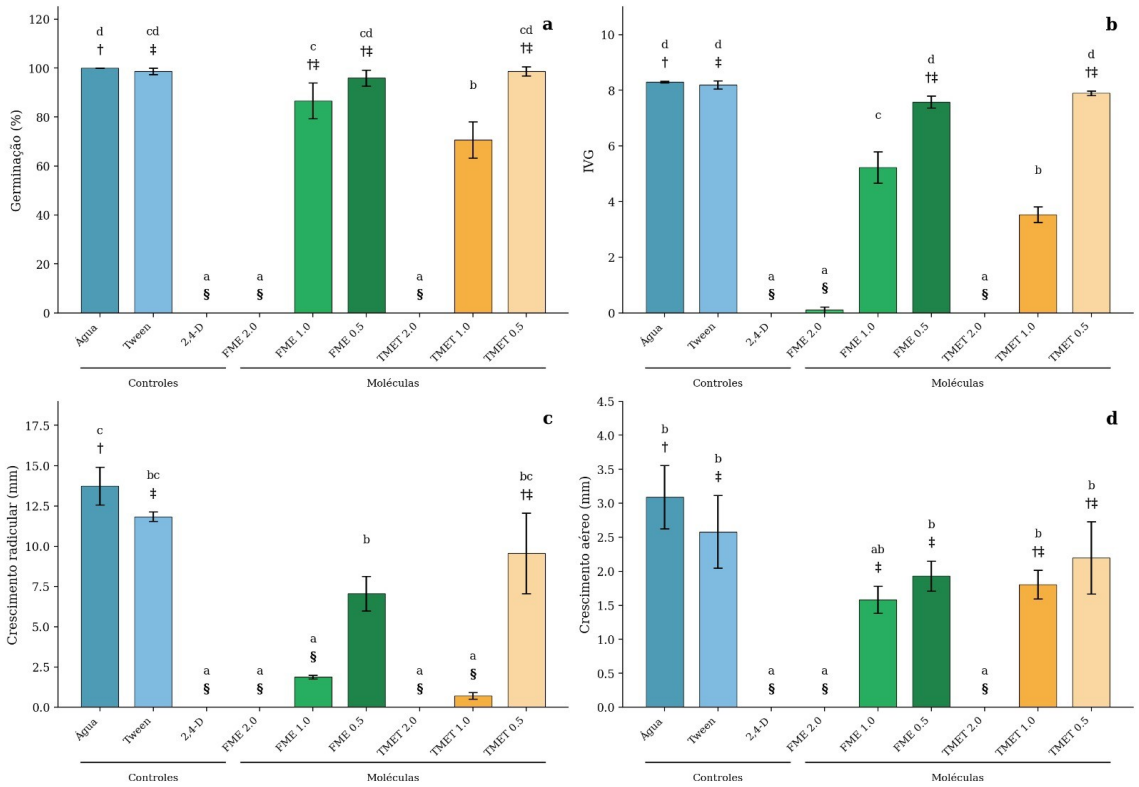
das comparações de médias pelos testes de Tukey e Dunnett ($p < 0,05$); quando necessário, aplicou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis seguido de Dunn ($p < 0,05$).

Resultados

De modo geral, FME e TMET apresentaram comportamento semelhante quanto à fitotoxicidade sobre *L. sativa*, sem diferenças estatísticas entre os compostos para a maioria das variáveis, com efeito dependente da concentração. Na concentração de 2,0 mmol L^{-1} houve inibição total da germinação, estatisticamente semelhante ao controle positivo 2,4-D; em 1,0 mmol L^{-1} ocorreu recuperação parcial, e em 0,5 mmol L^{-1} os percentuais aproximaram-se dos controles negativos, embora o FME ainda promovesse redução da germinação. O IVG acompanhou esse padrão. O crescimento radicular foi a variável mais sensível: na menor concentração, o TMET foi estatisticamente semelhante aos controles negativos, enquanto o FME manteve inibição significativa (CR médio de 7,1 mm vs. 13,8 mm no controle Água). O crescimento da parte aérea foi inibido totalmente a 2,0 mmol L^{-1}, mas não diferiu dos controles nas concentrações mais baixas (Figura 2).

Em *S. bicolor*, ambos os compostos também exibiram fitotoxicidade dependente da concentração. A concentração de 2,0 mmol L^{-1} reduziu drasticamente a germinação, sendo o FME o mais inibitório (PG de 2,6%), aproximando-se do 2,4-D, enquanto o TMET apresentou PG de 14,6%. O crescimento radicular foi inibido quase totalmente a 2,0 mmol L^{-1} para ambas as moléculas; na menor concentração, o TMET permitiu crescimento radicular significativamente maior que o FME (9,5 mm vs. 7,0 mm). A parte aérea teve seu crescimento reduzido significativamente apenas na maior concentração (Figura 3).

Figura 2 – Fluxograma esquemático das etapas do bioensaio de fitotoxicidade dos ésteres semissintéticos (FME e TMET) sobre *Lactuca sativa* e *Sorghum bicolor*.



Fonte: a autora (2026).

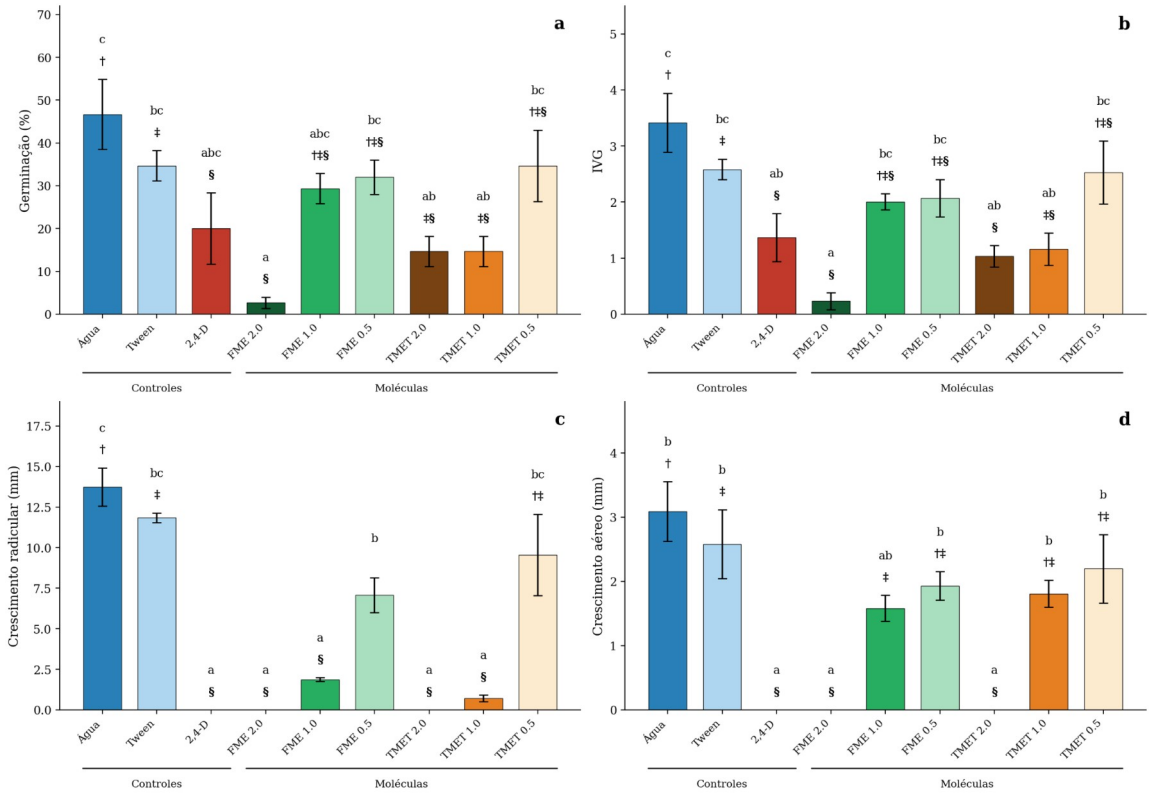


Figura 3 - Percentual de germinação (a), IVG (b), crescimento radicular (c) e crescimento da parte aérea (d) de *Sorghum bicolor* exposto a FME e TMET nas concentrações de 0,5, 1,0 e 2,0 mmol L^{-1}, além dos controles Água, Tween 20 e 2,4-D.

Fonte: a autora (2026).

Discussão

A comparação entre FME e TMET demonstrou que, embora derivados de compostos fenólicos estruturalmente relacionados, pequenas modificações químicas alteram propriedades como lipofilicidade e impedimento estérico, influenciando a absorção, a translocação e a interação das moléculas com seus possíveis sítios de ação nas plantas (Pinheiro *et al.*, 2024; Świderski *et al.*, 2025; Mushtaq e Fauconnier, 2024). Nas maiores concentrações, os dois ésteres apresentaram comportamento semelhante, promovendo intensa inibição da germinação e do crescimento; nas menores concentrações, contudo, observaram-se diferenças na intensidade da resposta, principalmente em *S. bicolor*, sugerindo que os grupos isopropil e metil do TMET modificam sua atividade fitotóxica.

O crescimento radicular foi o parâmetro mais sensível aos tratamentos em ambas as espécies, resultado esperado, já que o sistema radicular é o primeiro tecido em contato direto com as soluções-teste e apresenta intensa atividade mitótica nas células meristemáticas, tornando-se altamente sensível à ação de aleloquímicos (Mushtaq e Fauconnier, 2024; Roberto *et al.*, 2023). A menor sensibilidade de *S. bicolor* em relação a *L. sativa* está de acordo com estudos anteriores (Alves *et al.*, 2018) e pode ser explicada por características anatômico-fisiológicas das monocotiledôneas, como epiderme mais espessa, composição diferenciada de parede celular e mecanismos mais eficientes de detoxificação de xenobióticos.

Os resultados são compatíveis com o mecanismo de ação descrito para compostos fenólicos com atividade alelopática, que podem interferir simultaneamente na permeabilidade de membranas, na atividade enzimática, no metabolismo energético e no balanço hormonal das plântulas (Kostina-Bednarz *et al.*, 2023; Mushtaq e Fauconnier, 2024), o que sugere que a inibição observada resulta da atuação sobre múltiplos processos metabólicos, e não de um único alvo fisiológico.

Conclusão

Os ésteres semissintéticos FME e TMET apresentaram atividade fitotóxica significativa sobre a germinação, o IVG e o crescimento inicial de *L. sativa* e *S. bicolor*, de forma dose-dependente. O crescimento radicular foi o parâmetro morfométrico mais sensível às moléculas testadas, e o FME exibiu maior potencial fitotóxico inibitório do que o TMET. A espécie dicotiledônea *L. sativa* mostrou-se mais sensível aos compostos do que a monocotiledônea *S. bicolor*, demonstrando um perfil de resposta seletiva comparável a herbicidas auxínicos sintéticos e reforçando o potencial de FME e TMET como candidatos a herbicidas.

Referências

ALVES, T. A. *et al.* Toxicity of thymol, carvacrol and their respective phenoxyacetic acids in *Lactuca sativa* and *Sorghum bicolor*. **Industrial Crops and Products**, v. 114, p. 59-67, 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Programa Nacional de Redução de Agrotóxicos (PRONARA)**. Brasília, DF, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura. Acesso em: 16 jul. 2026.

KONCHINSKI, V. Brasil usa mais agrotóxicos que Estados Unidos e China juntos. **Brasil de Fato**, Curitiba, 5 fev. 2024. Disponível em: https://www.brasildefato.com.br/2024/02/06/brazil-uses-more-pesticides-than-the-us-and-china-together/. Acesso em: 16 jul. 2026.

KOSTINA-BEDNARZ, M.; PŁONKA, J.; BARCHANSKA, H. Allelopathy as a source of bioherbicides: challenges and prospects for sustainable agriculture. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 22, p. 471-504, 2023.

MAGUIRE, J. D. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, Madison, v. 2, n. 1, p. 176-177, 1962.

MUSHTAQ, W.; FAUCONNIER, M.-L. Phenolic profiling unravelling allelopathic encounters in agroecology. **Plant Stress**, v. 13, p. 100523, 2024.

PINHEIRO, P. F. *et al.* Synthesis and phytocytogenotoxic activity of N-phenyl-2-phenoxyacetamides derived from thymol. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 72, n. 9, p. 4610-4621, 2024a.

ROBERTO, C. E. O. *et al.* Phytogenotoxicity of thymol and semisynthetic thymoxyacetic acid in pre/post emergence of model plants and weeds. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 13, p. 38955-38969, 2023.

ŚWIDERSKI, G. *et al.* Study of the relationship between the structures and biological activity of herbicides derived from phenoxyacetic acid. **Materials**, v. 18, n. 7, p. 1680, 2025.