

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP CÂMPUS
DE JABOTICABAL**

**AVALIAÇÃO DE DERIVA DO HERBICIDA 2,4-D POR
APLICAÇÃO AÉREA REMOTA E EFEITOS EM
PLANTAS BIOINDICADORAS DE EXPOSIÇÃO**

Wislainy Rabelo Cassiano de Moura

Engenheira agrônoma

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP CÂMPUS
DE JABOTICABAL**

**AVALIAÇÃO DE DERIVA DO HERBICIDA 2,4-D POR APLICAÇÃO
AÉREA REMOTA E EFEITOS EM PLANTAS BIOINDICADORAS DE
EXPOSIÇÃO**

Discente: Wislainy Rabelo Cassiano de Moura

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Bianco de Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Claudinei da Cruz

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,
Câmpus de Jaboticabal, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Mestre em Produção Vegetal

M929a Moura, Wislainy Rabelo Cassiano de
Avaliação de deriva do herbicida 2,4-d por aplicação aérea remota e
efeitos em plantas Bioindicadoras de exposição / Wislainy Rabelo
Cassiano de Moura. -- Jaboticabal, 2025
51 p. : tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Leonardo Bianco de Carvalho

1. Plants. 2. Effect of herbicides on. 3. Drone. 4. Indicadores. I.
Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: AVALIAÇÃO DE DERIVA DO HERBICIDA 2,4-D
POR APLICAÇÃO AÉREA REMOTA E EFEITOS
EM PLANTAS BIOINDICADORAS DE EXPOSIÇÃO**

**AUTORA: WISLAINY RABELO CASSIANO DE MOURA ORIENTADOR:
LEONARDO BIANCO DE CARVALHO COORIENTADOR: CLAUDINEI DA CRUZ**

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em
Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **CLAUDINEI DA CRUZ**
Data: 15/11/2025 12:51:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. CLAUDINEI DA CRUZ (Participação Virtual)
Departamento de Agronomia / Centro Universitário Educacional de Barretos
(UNIFEB) - Barretos/SP

Documento assinado digitalmente
 **IGOR CRUZ MALASPINA**
Data: 16/11/2025 16:15:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. IGOR CRUZ MALASPINA (Participação Virtual)
Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos (UNIFEB) /
Barretos/SP

Documento assinado digitalmente
 **PAMELA CASTRO PEREIRA**
Data: 17/11/2025 08:14:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. PÂMELA CASTRO PEREIRA (Participação Virtual)
Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos (UNIFEB) /
Barretos/SP

Jaboticabal, 14 de novembro de 2025.

DADOS CURRUCULARES DA AUTORA

Wislainy Rabelo Cassiano de Moura – Agrônoma, filha de Benilde Fernandes Rabelo e João Aurélio Cassiano de Moura, nasceu em Ananás - TO, no dia 2 de novembro. Coursou os Ensino Médio na E.E. Professora Paulina Nunes De Moraes e E.E.Prof.Benedito Pereira Cardoso de Barretos São Paulo. Em 2018, iniciou o curso de Agronomia no Centro Universidade da Fundação Educacional de Barretos (UNIFEB). Estagiou por 3 anos no Laboratório de Ecotoxicologia e Eficácia de agrotóxicos de Barretos (LEEA). Atualmente, integra os grupos de pesquisas do Laboratório de Matologia (LabMato) pertencente ao departamento de Fitossanidade da FCAV e no grupo de pesquisa LEEA do UNIFEB. Em novembro de 2025, submete-se à banca examinadora para a obtenção do título de Mestre em Agronomia.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

SUMÁRIO

	Páginas
1. INTRODUÇÃO	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Herbicidas	11
2.2- Dinâmica ambiental herbicida.....	11
2.2.1 Deriva	12
2.3 – Tecnologias de aplicação	13
2.4 – Plantas testes	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1. Cultivo das plantas testes bioindicadores	17
3.2. Procedimento experimental de aplicação	18
3.3. Avaliações e análise estatística.....	9
4. RESULTADOS e DISCURSÃO	19
4 1. Sensibilidade e efeito de deriva para a planta bioindicadora abóbora	19
4.2. Sensibilidade e efeito de deriva para a planta bioindicadora alface	26
4 3. Sensibilidade e efeito de deriva para a planta bioindicadora pepino	31
4 4. Sensibilidade e efeito de deriva para a planta bioindicadora tomate	36
5. CONCLUSÃO.....	44
6. REFERÊNCIAS	45

AVALIAÇÃO DE DERIVA DO HERBICIDA 2,4-D POR APLICAÇÃO AÉREA REMOTA E EFEITOS EM PLANTAS BIOINDICADORAS DE EXPOSIÇÃO

RESUMO – A deriva de pulverização refere-se ao desvio das gotas de um agrotóxico ou volatilização para fora da área-alvo. Assim, avaliou-se a sensibilidade relativa das plantas bioindicadoras expostas ao herbicida 2,4-D na faixa de cobertura de aplicação, determinou-se os possíveis efeitos do processo de deriva. As plantas bioindicadoras utilizadas no estudo foram abóbora (*Cucurbita pepo*), alface (*Lactuca sativa*) pepino (*Cucumis sativus*) e o tomate (*Solanum lycopersicum*). Para a aplicação do 2,4-D utilizou um drone aplicador DJI Agras MG-1P (AAR) e aplicações foram realizadas em alturas de voos (3,0; 6,0; 9,0; e 12,0 m), com velocidade de voo 16 a 18 km h⁻¹. Para a avaliação da deriva de aplicação foi aplicado as doses de 1,5 e 3,5 L ha⁻¹ do 2,4-D. Foi determinadas cinco distâncias após o centro da faixa de aplicação ao lado direito e esquerdo (5, 10,20,0; 30,0 e 40,0 m), nas quais foram colocados os vasos com as plantas testes. Os efeitos de fitotoxicidade nas plantas bioindicadoras foram avaliados pelos índices de injurias de fitotoxicidade observadas em 10, 24, 36, 48, 56 dias após exposição. Após as análises de dados foi possível evidenciar à deriva do herbicida durante as aplicações, sendo que todas as plantas apresentaram sensibilidade, mas as plantas que apresentaram maior fitotoxicidade foram alface e tomate. Neste estudo evidenciou-se que as plantas abóbora, alface, pepino e tomate utilizado como bioindicadores apresentam sensibilidade ao herbicida, podendo ser empregadas em programas e estudos de avaliação de deriva de aplicação aérea remota (AAR). Os sinais de fitotoxicidade das quatro plantas indicadoras demonstram que a AAR apresenta efeito de deriva para o 2,4-D, em função da dose e da altura de voo, sendo que para dose menor os efeitos são mais evidentes em voos com menor altura em relação ao alvo e para a maior dose voos em maiores alturas.

Palavras-chaves: agrotóxicos, bioindicador, dinâmica ambiental, drone, herbicida

EVALUATION OF 2,4-D HERBICIDE DRIFT BY REMOTE AERIAL APPLICATION AND EFFECTS ON BIOINDICATOR PLANTS OF EXPOSURE

ABSTRACT - Spray drift refers to the deviation of pesticide droplets or volatilization outside the target area. Therefore, the relative sensitivity of bioindicator plants exposed to the herbicide 2,4-D within the application coverage area was evaluated, and the possible effects of the drift process were determined. The bioindicator plants used in the study were pumpkin (*Cucurbita pepo*), lettuce (*Lactuca sativa*), cucumber (*Cucumis sativus*), and tomato (*Solanum lycopersicum*). For the application of 2,4-D, a DJI Agras MG-1P (AAR) applicator drone was used, and applications were carried out at flight heights of 3.0, 6.0, 9.0, and 12.0 m, with a flight speed of 16 to 18 km h⁻¹. For the evaluation of application drift, doses of 1.5 and 3.5 L ha⁻¹ of 2,4-D were applied. Five distances were determined from the center of the application strip to the right and left (5, 10, 20.0, 30.0, and 40.0 m), at which the pots with the test plants were placed. The phytotoxicity effects on the bioindicator plants were evaluated by the phytotoxicity injury indices observed at 10, 24, 36, 48, and 56 days after exposure. After data analysis, it was possible to demonstrate herbicide drift during applications, with all plants showing sensitivity, but lettuce and tomato were the plants that showed the greatest phytotoxicity. This study showed that pumpkin, lettuce, cucumber, and tomato, used as bioindicators, are sensitive to the herbicide and can be used in programs and studies evaluating drift from remote aerial application (RAA). The signs of phytotoxicity from the four indicator plants demonstrate that AAR exhibits a drift effect for 2,4-D, depending on the dose and flight altitude, with lower doses showing more evident effects in flights at lower altitudes relative to the target, and higher doses showing effects in flights at higher altitudes.

Keywords: pesticides, bioindicator, environmental dynamics, drone, herbicide

1. INTRODUÇÃO

O consumo anual de agrotóxicos no mundo é de aproximadamente 2,5 milhões de toneladas e no Brasil tem sido superior a 300 mil toneladas de produtos comerciais, quando se trata de ingrediente ativo (i.a.) são consumidas cerca de 130 mil toneladas representando um aumento no consumo de agrotóxicos de 700% nos últimos quarenta anos, enquanto a área agrícola aumentou 78% nesse período (Spadotto & Gomes, 2021). De acordo com o (IBAMA 2022), a comercialização de herbicida aumentou do ano de 2009 a 2022, com 492,35 mil toneladas de vendas totais de produtos formulados e 241,54 mil toneladas de vendas totais de produtos técnicos por ano.

A utilização de herbicidas se tornou importante na agricultura devido ao aumento da produção agrícola, pois minimiza a matocompetição de plantas daninhas e auxilia no aumento da produtividade. Estes são produtos químicos com diferentes mecanismos de ação, com objetivo de controlar ou regular o crescimento de plantas daninhas em locais indesejáveis ((Gupta, 2011) e (Karam, 2005)). O herbicida 2,4-D (ácido 2,4- diclorofenoxiacético) é uma auxina sintética que contém ácido fenoxialcanóico como produto químico principal, e imita a auxina natural nas plantas ácido indol-3-acético (Song, 2014). é um herbicida seletivo e sistêmico que mata ou controla ervas daninhas de folhas largas (dicotiledôneas.O 2,4-D é um regulador de crescimento que possui efeito semelhante ao do hormônio auxina, sendo amplamente utilizado para controlar ervas daninhas de diferentes culturas anuais (Peres et al., 2017).

A intensificação dos sistemas produtivos agrícolas promoveu a liberação indireta de subdoses deste herbicida no ambiente, devido a facilidade de evaporação da molécula, durante as pulverizações devido a temperatura ambiente, umidade relativa, pressão de vapor e velocidade do vento, entre outros fatores (Egan et al., 2012; Egan et al., 2014; Peres et al., 2017). Apesar das reformulações feitas nas formulações do 2,4-D, para reduzir seu movimento fora do alvo, ainda há ocorrência de subdoses promovendo danos em plantas sensíveis (Culpepper et al., 2018; Ramos et al., 2021; Johnson et al., 2023). Portanto, entender a dinâmica ambiental de herbicidas depende de diversos fatores que envolvem a formulação herbicida, a metodologia de aplicação e os

cuidados para obter uma aplicação com qualidade.

As novas tecnologias implantadas na agricultura têm um papel importante no aumento da produtividade em campo (Carrer et al., 2022). Recentemente, surgiram veículos aéreos não tripulados (VANTs), conhecidos como drones, como uma solução potencial para melhorar a tecnologia de pulverização aérea (Liao et al., 2019; Meesaragandla et al., 2024). No entanto, apesar de haver uma literatura crescente que avalia os efeitos da deriva da pulverização no ambiente agrícola em plantas não alvo (Moore et al., 2021), os possíveis efeitos ambientais da aplicação aérea remota (AAR) ainda necessitam de avaliação.

Dessa forma, é preciso analisar e estudar os fatores que promovem o aumento dos processos de dinâmica ambiental dos herbicidas, para melhorar a qualidade das aplicações aérea remota (AAR) e aumentar o suporte ao desenvolvimento da tecnologia. A utilização de organismos bioindicadores naturais são úteis na identificação dos aspectos ambientais positivos e negativos da aplicação de herbicidas (Parmar et al., 2016; Della Vechia et al., 2021), essa é uma técnica acessível para informar sobre um possível problema de contaminação do ecossistema, por ser de baixo custo, fácil condução e apresentam respostas rápidas (Nunes e Vidal, 2009; Silva et al., 2020; Della Vechia et al., 2021).

Algumas plantas sensíveis são usadas em testes, como bioindicadoras de deriva ou volatilidade de herbicidas (Zaccaro- Gruene et al., 2022; Ghosh et al., 2023). Assim, por meio destes testes é possível visualizar os efeitos de fitotoxicidade causados pelos herbicidas nas plantas, permitindo desenvolver estratégias para evitar ou diminuir estes processos recorrentes durante as aplicações de herbicidas na agricultura.

Durante as pulverizações de herbicidas via aplicação aérea remota, alguns processos de dinâmica ambiental podem ser intensificados, tais como: aumento da concentração de produto por unidade de área, exposição de organismos não alvo e o fenômeno de deriva. Com tudo, é importante determinar e caracterizar as distancias após a faixa de pulverização que pode ocorrer deriva, adequar as doses e alturas de voo as condições de aplicação, utilizando organismos bioindicador. Portanto, entender a dinâmica ambiental de herbicidas depende de diversos fatores que envolvem a formulação de herbicida, a metodologia de aplicação e os cuidados para obter uma aplicação com qualidade.

Os objetivos deste estudo foram:

- i) Avaliar a sensibilidade relativa das plantas bioindicadoras alface (*Lactuca sativa*), abobora (*Cucurbita pepo*), pepino (*Cucumis sativus*), e tomate (*Solanum lycopersicum*), expostas ao herbicida 2,4-D na faixa de cobertura de aplicação do drone;
- ii) Determinar os possíveis efeitos do processo de deriva do 2,4-D em plantas bioindicadoras alface (*Lactuca sativa*), abobora (*Cucurbita pepo*), pepino (*Cucumis sativus*), e tomate (*Solanum lycopersicum*), após à faixa de cobertura de aplicação aérea remota (AAR) via drone.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Herbicidas

Os herbicidas são moléculas projetadas para inibir locais alvo específicos, com mecanismo de ação crítico para as vias bioquímicas e fisiológicas das plantas daninhas (Pachuta et al. 2023), são divididos em dois grupos e classificados de acordo com seu mecanismo de ação. O desenvolvimento de herbicidas sintéticos iniciou em meados do século XX, com o 2,4-D, no ano de 1941 a molécula deste herbicida foi comercializada (Mais agro, 2025).

Durante a Revolução Verde no Brasil, o uso de herbicidas se intensificou. A utilização de herbicidas se tornou importante após a adoção do plantio direto nos anos 1990 e o desenvolvimento de culturas geneticamente modificadas resistentes a herbicidas nos anos 200 (Mais Agro, 2025). O glifosato é o herbicida mais comercializado no Brasil e no mundo, seguido pelo 2,4-D, atrazina, S-metolacoloro, glufosinato de amônio e mancozebe.

O 2,4-D pode imitar uma overdose de ácido indol acético (IAA), causando regulação positiva de etileno biossíntese e resposta ao ácido abscísico (ABA) (Sterling & Hall, 1997; Grossman, 2003; Perez et al., 2022). O herbicida promove epinastia foliar, inchaço dos tecidos, enrolamento, necrose tecidual, senescência e morte de plantas (Grossman, 2007; Grossmann, 2010).

2.2. Dinâmica ambiental herbicida

Pode ser definido como comportamento do herbicida no ambiente, tal como o seu movimento, retenção e a degradação após ser liberado no meio ambiente, pode ser influenciada pelas condições climáticas, do solo e pelas características físico-químicas do herbicida. Com a necessidade do aumento da produtividade das culturas, houve um aumento no consumo de herbicidas, e consequentemente agravou o cenário de contaminação do solo e ambiente aquático, contudo organismos não – alvos estão sendo afetados (Aktar et al., 2009).

Diversos fatores bióticos afetam a persistência, a mobilidade e a estabilidade dos agrotóxicos no solo, e estão diretamente ligados a eficácia de aplicação. Assim, o solo possui propriedade que interferem na mobilidade e degradação dos produtos, por meio dos processos de adsorção, dessorção,

degradação (decomposição) (Valarini et al., 2017). Alguns herbicidas têm capacidade de permanecer ativos no solo por mais tempo, em concentração capaz de causar fitotoxicidade a cultura subsequente (carryover) (Negrisoli et al., 2021).

Dentre os processos de dinâmica ambiental após a pulverização de herbicidas está o fenômeno de deriva, que é caracterizado como o desvio de gotas do alvo quando parte das gotas não atinge o alvo, e deriva por volatilização, provocada pela evaporação (Ding et al., 2019). Herbicidas auxínicos como o 2,4-D são propensos à volatilização, devido suas características físico químicas que pode passar do estado líquido para gasoso quando em contato à condições climáticas adversas (altas temperaturas, humidade baixa, presença de vento), e pode acarretar o transporte do produto pelo vento para ambientes não-alvo (Brochado et al. 2022).

2.3. Tecnologias de aplicação

A implantação das novas tecnologias, como UAVs, robótica e Internet das Coisas (IoT), auxiliam no aumentar a produtividade, sustentabilidade e a eficiência na agricultura, essas tecnologias são denominadas como agricultura de precisão (Puppala, H et al., 2023). Os veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), comumente conhecidos como drones, fazem parte dos Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas (UAS) projetados para realizar uma tarefa específica (Chouhan,S.S et al., 2025).

Essa tecnologia pode ajudar a diminuir a capacidade de deriva, pois durante a pulverização aérea com drones, as hélices dos rotores geram fluxo de ar. Este fluxo e os movimentos naturais externos do ar podem alterar as trajetórias das gotas e afetam a deposição de gotículas líquidas na parte aérea das culturas (Wang et al., 2017; Yang et al., 2018; Wen et al., 2019; Meesaragandla et al., 2024), e acelerar ainda mais sua chegada ao alvo e melhorar a penetração na copa das culturas (Chen et al 2022, Sánchez-Fernández et al., 2023).

Para aumentar a eficiência e o rendimento de pulverização aérea remota, estão sendo feitas tentativas de alargar a faixa usando alturas de voo elevadas acima das plantas, chegando a 10 m, altas velocidades de deslocamento dos drones de cerca de $6,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, e usando soluções de pesticidas condensadas em calda e pulverizando gotas finas (Wang et al., 2017; Yang et al., 2018; Wen., et al., 2019). Assim é recomendado reduzir a altura de voo dos drones de pulverização como uma estratégia de prevenção de deriva de gotículas (Chen et al., 2020).

Os UAVs oferecem flexibilidade e qualidade durante análise das colheitas em resoluções espaciais e temporais desejadas, promovendo uma melhor operação, e permite com que as sejam decisões precisas (Nebiker, Set al., 2008). Alguns drones agrícolas disponíveis são dispositivos semiautomáticos, (Hafeez, A et al., 2023), outros possuem automação. As novas tecnologias oferecem soluções seguras, confiáveis e acessíveis para as atividades agrícolas (Khan, N et al., 2021)

2.4. Plantas testes

A produção alimentos de forma segura, saudáveis e sustentáveis é uma prioridade nacional e internacional. Assim são realizado estudos que utilizam bioindicadores de exposição da fauna e flora brasileira, pois é uma técnica alternativa viável para o monitoramento de herbicidas (Leonel et al., 2016). Assim as plantas abobórea, alface, pepino e tomate podem ser utilizadas em estudos como bioindicadores, devido a importância comercial e as características físico químicas. plantas abobórea, alface, pepino e tomate.

Os primeiros cultivo do gênero *Cucurbita* sp foi pelos povos Ameríndios (Veronezi, C. M., & Jorge, N. 2012). A cultura da abobora tem grande importância no Brasil, pois seu cultivo influencia diretamente na geração de emprego. Além disso, possui propriedades medicinais sendo rica em polissacarídeos, ácidos fenólicos, vitaminas, fibras alimentares e oligoelementos (Ji, X. 2023).

No estudo em que os autores (Liu, W. et al., 2025) investigaram os efeitos da exposição ao chumbo (Pb) e o ozono (O_3), individualmente e em combinação, em mudas de abóbora, com o objetivo de investigar como o (Pb) e o (O_3) afetam os parâmetros de crescimento das mudas de abóbora e o impacto do Pb e do O_3 no seu desempenho fotossintético, foi evidenciado sensibilidade da planta após a exposição ao (Pb) e (O_3).

A alface (*Lactuca sativa* L.) é uma das hortaliças mais populares do mundo, possui alto valor energético e possui poucas restrições alimentares (Almeida, UT 2025). No Brasil é a hortaliça mais consumida, o seu cultivo é simples (Aires et al., 2020). No estudo realizado pelos autores (Kermeur, N. et al., 2025), nanomagnetitas foram utilizadas para aumentar a absorção de Cd pela alface (*Lactuca sativa*), assim um dos objetivos foram avaliar a toxicidade da combinação Cd/nanomagnetitas na alface.

Pepino (*Cucumis sativus* L.) é uma importante cultura de cultivo protegido

possui índice alto de cultivo em todo o mundo. Em 2023, a China produziu 80,22 milhões de toneladas de pepino em 1,33 milhões de hectares de área de cultivo, representando quase 82% do total global (Dong, Y et al., 2025). A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos recomenda o pepino como planta teste (US EPA, 1996) para ser utilizada em estudos de ecotoxocologia (Konate, A. et al., 2017).

No estudo realizado pelos autores (Konate, A. et al., 2017) pepino foi utilizado para investigar a fitotoxicidade de nanopartículas e Fe_3O_4 em massa, por meio do alongamento da parte aérea e da raiz e da biomassa. A biomassa do pepino foi significativamente alterada com o tratamento com nano- Fe_3O_4 em baixa concentração e com Fe_3O_4 em massa em alta concentração, a germinação das sementes, o comprimento da parte aérea e da raiz das plantas de pepino não foi afetado pelos tratamentos com nano- Fe_3O_4 e Fe_3O_4 em massa (Konate, A. et al., 2017).

As cultivares de tomate possuem diversas características morfológicas, físico-químicas e sensoriais, são consumidos tanto em natura (fresco) quanto para processamento em diversos produtos de valor agregado (Pinela et al., 2022). É uma importante fonte alimentar de carotenoides, os tomates contribuem para o perfil de carotenoides no plasma humano (Mendelová et al., 2013). Os autores (Andreasidou, E. et al., 2025) avaliaram a absorção e translocação de contaminantes emergentes (CECs) em plantas de tomate irrigadas com água produzida (controle), água residual tratada (ART) e em condições de adição de CECs (ART+CEC, ART+CEC).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Ecotoxicologia e Eficácia dos Agrotóxicos, LEEA, do Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos, Unifeb.

O herbicida avaliado foi o 2,4-D (ácido diclorofenoxiacético), na formulação DMA®, com 806,0 g i.a. L⁻¹, da Corteva Agriscience do Brasil Ltda. O produto é uma solução aquosa concentrado (SL) possui alta solubilidade em água, seu ingrediente ativo esta na forma de sal de dimetilamina do ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D-dimetilamônio).

3.1. Cultivo das plantas testes bioindicadoras

Para a germinação das plantas bioindicadoras de alface (*Lactuca sativa*), abobora (*Cucurbita pepo*), pepino (*Cucumis sativus*), tomate cereja (*Solanum lycopersum*), utilizou-se bandejas de isopor para formação de mudas, com substrato orgânico Carolina Soil®. Após a emergência e formação das primeiras folhas verdadeiras, as plantas foram transferidas para vasos plásticos, com capacidade para 1 L, contendo uma mistura de solo tipo latossolo, substrato orgânico (Carolina Soil®) e areia fina lavada (1;1;1; vv⁻¹). Após o estabelecimento das mudas a esta condição, aproximadamente 15 dias, estas foram utilizadas no experimento.



Figura 1 A. Vista geral das plantas bioindicadoras utilizadas no experimento. B. Detalhe de uma planta de tomate (*Solanum lycopersicum*).

3.2. Procedimento experimental de aplicação

Para a aplicação do herbicida 2,4-D foi utilizado um drone aplicador DJI Agras MG-1P (AAR) com faixa de cobertura de 5,0 m e volume de aplicação de 10 L ha⁻¹, nas alturas de voos de 3,0; 6,0; 9,0; e 12,0 m (Tabela 1) e velocidade de voo de 16,0 a 18,0 km h⁻¹, as aplicações foram divididas de acordo com as doses, alturas de voos e cultura, assim para cada cultura foram realizadas 8 aplicações. A velocidade do voo não foi alvo de avaliação e foi mantida de forma manual pelo operador do drone.

Para a avaliação da sensibilidade das plantas bioindicadoras, estas foram dispostas em 0,0m (faixa central de voo e de cobertura de pulverização) e em 5,0m a direita e a esquerda da faixa central de pulverização (Tabela 1). Para a avaliação da deriva de aplicação, foram dispostas as plantas bioindicadoras a 10,0; 20,0; 30,0; e 40,0 m, a direita e a esquerda, da faixa central de pulverização (Tabela 1).

As doses do herbicida 2,4-D pulverizadas foram de 1,5 (T1) e 3,5 L ha⁻¹ (T2) (Tabela 1), em delineamento de bloco casualizado (DBC) em esquema fatorial sendo considerados três fatores 2 x 11 x 4 (2 doses, 11 distâncias e 4 alturas de voo).

Tabela 1. Esquema de pulverização do herbicida 2,4-D para a avaliação de sensibilidade e efeito de deriva em plantas bioindicadoras.

Doses (L ha ⁻¹)	Altura de voo do alvo (m)	Faixa de Cobertura de pulverização (m)		Faixa de deriva (m)
		Direita	Esquerda	
1,5	3,0	0,0	0,0	10,0
	6,0			20,0
3,5	9,0	5,0	5,0	30,0
	12,0			40,0

No momento do voo (V1 = 3,0 m e V2 = 6,0 m) de altura a temperatura do ambiente foi de 30,0 °C, a umidade relativa de 60,0% e o vento de 13,0 km h⁻¹ na direção oeste. No voo (V3 = 9,0 m) de altura a temperatura do ambiente foi de 30,0 °C, a umidade relativa de 62,0% e o vento de 12,0 km h⁻¹ na direção Oeste. No voo (V4 = 12,0 m) de altura a temperatura do ambiente foi de 30,0 °C, a umidade relativa de 64,0% e o vento de 14,0 km h⁻¹ na direção Oeste- Sudoeste.

3.3. Avaliações e análise estatística

As avaliações de sensibilidade e dos efeitos de deriva foram realizadas em 10, 24, 36, 48 e 56 dias após exposição (DAE). Os índices de fitointoxicação utilizados para compor as porcentagens avaliadas foram: murcha de folhas e caule, crescimento irregular de folhas e ramos, encarquilhamento de folhas, inibição do crescimento, clorose e necrose das folhas e ramos e morte da planta. Em 56 dias após aplicação, de cada espécie de planta bioindicadora, foi avaliado o comprimento radicular e da parte aérea (cm) e biomassa fresca (g) em uma balança semi-analítica. Após 7 dias em temperatura ambiente foi obtida a massa seca (g). Estes dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e suas médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os valores de porcentagem de fitotoxicidade atribuídos as plantas bioindicadores foram também submetidos a análise de variância (Dose x distâncias de avaliação) e (Doses x Altura de voo do drone) e e suas médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade utilizando o software Agroestat® (Barbosa & Maldonado Jr, 2015).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Sensibilidade e efeito de deriva para a planta bioindicadora abóbora

A ocorrência dos sinais de fitotoxicidade nas plantas variaram de acordo com a altura de voo e doses. Para a abóbora, em 10 dias após a exposição (DAE) ocorreu clorose na dose $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ na altura de voo de 3,0 m e na dose $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ com as alturas de voos 3,0; 9,0; e 12 m apresentou crescimento e desenvolvimento irregular (Tabela 2). O sinal de fitotoxicidade epinastia ocorreu na dose $3,5 \text{ L ha}^{-1}$, em 6,0; 9,0; e 12 m e necrose caulinar e foliar nas doses $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ e $3,5 \text{ L ha}^{-1}$. No T1 ocorreu nos voos 6,0; 9,0; e 12,0 m de altura. Para o $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ nos voos 3,0 m e 12,0 m (Tabela 2).

Em 24 DAE, em $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ (9,0 m e 12,0 m) e $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ (todas as alturas de voo) ocorreu clorose, crescimento e desenvolvimento irregular na dose $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ (todas as alturas de voo) e inibição de crescimento na dose $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ nas alturas 9,0 m e 12,0 m (Tabela 2). O encarquilhamento das folhas ocorreu na dose $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ nas alturas de voo de 6,0; 9,0; e 12,0 m e epinastia em $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ em 12,0 m de altura (Tabela 2). A necrose culinar e foliar nas doses $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ e $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ (6,0; e 9,0 m de altura). Em $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ ocorreu necrose em 3,0 m e 9,0 m e morte das plantas teste na dose $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ nos voos 6,0 m e 12,0 m de altura (Tabela 2).

Na avaliação de 36 DAE as plantas de abóbora que foram expostas às doses $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ e $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ apresentaram clorose e crescimento e desenvolvimento irregular em todas as alturas de voo avaliadas (Tabela 2) e inibição de crescimento na dose $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ em 9,0 m e 12,0 m e encarquilhamento de folhas ocorreu nas doses $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ e $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ (Tabela 2).

Nas duas doses ocorreu epinastia de folhas e necrose caulinar nos voos de 3,0 m de altura ($1,5 \text{ L ha}^{-1}$) e 3,0 m e 12,0 m de altura ($3,5 \text{ L ha}^{-1}$) e morte das plantas em $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ nas alturas de voo 6,0 m e 12,0 m. Em 56 DAE ocorreu de clorose de folhas e crescimento e desenvolvimento irregular em $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ e $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ (Tabela 2). Na dose $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ ocorreu inibição de crescimento em 12,0 m. Nas duas doses de 2,4-D ocorreu encarquilhamento de folhas, necrose caulinar e foliar (Tabela 2).

Tabela 2. Sinais de fitotoxicidade para a planta teste abobora (*Cucurbita pepo*) expostas de 2,4-D após aplicação aérea remota.

Sinais de Fitotoxicidade/Dias após exposição (DAE)		10	24	36	56
1	Clorose (Cl)	1\$ e 2*,&#,\$	1#,\$ e 2*,&#,\$	1&#,\$ e 2*,&#,\$	1&#,\$ e 2*,&#,\$
2	Crescimento/desenvolvimento irregular	1\$	1*,&#,\$	1*,&#,\$ e 2*,&#,\$	1*,&#,\$ e 2*,&#,\$
3	Alongamento caulinar	SF	SF	SF	SF
4	Inibição de crescimento	SF	2#,\$	2#,\$	2\$
5	Encarquilhamento de folhas	SF	2&#,\$	1\$ e 2*,&#,\$	1\$ e 2*,&#,\$
6	Perda de sustentação de folhas e ramos	SF	SF	SF	SF
7	Epinastia	2&#,\$	2\$	1* e 2*,\$	1* e 2*,\$
8	Nódulos caulinares	SF	SF	SF	SF
9	Necrose nervuras foliares	SF	SF	SF	SF
10	Necrose caular e foliar	1&#,\$ e 2*,\$	1&#,\$ e 2*,\$	1*,&#,\$ e 2*,&#,\$	1*,&#,\$ e 2*,&#,\$
11	Morte de plantas	SF	2&#,\$	2\$	2\$
Doses		1,5 L ha ⁻¹ (1)		3,5 L ha ⁻¹ (2)	
Altura (m)		3 *	6 &	9 #	12 \$

Alturas de voos: 3,0 m →(*); 6,0 m →(&); 9,0 m →(#); 12,0 m →(\$); SF = sem fitotoxicidade; Doses = 1 →(1,5 L ha⁻¹) e 2 →(3,5 L ha⁻¹).

Em 10 dias após exposição (DAE), na dose de 1,5 L ha⁻¹ ocorreu maior porcentagem de fitotoxicidade (31,81%) em 5,0 m a esquerda da faixa central de pulverização, diferindo significativamente das demais distâncias avaliadas (Tabela 3). Os principais sinais de fitotoxicidade foram necrose foliar e desenvolvimento irregular do caule. Na esquerda da faixa de aplicação ocorreram efeitos de deriva entre 30,78% (10,0 m) e 22,54% a 40,0 m da faixa de aplicação (Tabela 2). Na avaliação, na dose de 3,5 L ha⁻¹ o maior efeito de fitotoxicidade ocorreu a 20,0 m a direita da faixa de aplicação (36,70%), diferindo significativamente das demais distâncias (Tabela 3). Nesta dose os valores de fitotoxicidade variaram em torno de 30,0% de efeito em todas as distâncias avaliadas (Tabela 3). Os principais sinais de fitotoxicidade observados na abóbora foram crescimento irregular do caule, epinastia, clorose e necrose foliar.

Em 24 DAE, na dose de $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ o maior efeito de fitointoxicação da abóbora ocorreu na faixa central de pulverização (45,43%), diferindo significativamente das demais distâncias avaliadas (Tabela 3). Na dose de $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ a maior fitointoxicação ocorreu em 20,0 m a direita (48,00%) e 43,00% na faixa central de pulverização diferindo entre si e entre as demais distâncias avaliadas (Tabela 3). Os sinais de fitotoxicidade foram similares aos descritos na avaliação de 10 dias após aplicação.

Em 36 DAE, a maior fitointoxicação ocorreu na faixa central de pulverização (67,88%), em $1,5 \text{ L ha}^{-1}$, diferindo significativamente das demais distâncias (Tabela 3), porém todas as distâncias, a direita e a esquerda da faixa central de pulverização, as plantas apresentaram fitotoxicidade entre 46,50% e 56,50% (Tabela 3). Na dose de $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ foi possível verificar a ocorrência de deriva entre 10,0 m e 40,0 m, a esquerda da faixa central de pulverização, com valores entre 75,50% a 77,00%, sem diferença significativa entre si e entre 20,0 e 30,0 m a direita, com valores de 76,25% e 77,63% de fitotoxicidade, sem diferença entre si (Tabela 3). Apesar de ocorrer efeito nas plantas de abóbora fora da faixa de cobertura da pulverização do drone nas avaliações anteriores, nesta ocorreu maior valores de fitointoxicação em relação a área de cobertura (0,0 m) (Tabela 3). Nesta avaliação ocorreu sinais de crescimento irregular do caule, encarquilhamento foliar, epinastia de folhas jovens, além de clorose e necrose foliar.

Em 48 DAE, em $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ a maior porcentagem de fitotoxicidade ocorreu em 20,0 m a direita e a esquerda na faixa de cobertura de pulverização, diferindo das demais distâncias (Tabela 3) e em $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ em 20,0 m a direita da faixa de cobertura, com 83,34% de fitointoxicação (Tabela 3).

Em 56 DAE, em $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ as maiores porcentagens de fitotoxicidade ocorreram a 20,0 m a direita e a esquerda da faixa de cobertura, diferindo das demais distâncias avaliadas (Tabela 3). Em $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ ocorreu 88,63% de fitotoxicidade a 20,0 m a direita e de 89,38% a 10,0m a esquerda da faixa de cobertura, diferindo das demais faixas de avaliação (Tabela 3).

Após análise de dados das plantas de abóbora que estava na faixa central durante a pulverização com as doses $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ foi identificado que a planta apresenta sensibilidade ao herbicida, pois apresentou sinais de fitotoxicidade graves como crescimento e desenvolvimento irregular, inibição de crescimento e necrose culinar e foliar.

No estudo conduzido por (Chen et al., 2024) à abóbora 'Orange Smoothie' tratadas com 2,4-D no estágio vegetativo apresentaram sintomas de fitotoxicidade, como desenvolvimento irregular de folhas e caules um dia após aplicação.

Tabela 3. Porcentagem (%) de efeito de fitotoxicidade do herbicida do 2,4-D para planta bioindicadora abóbora (*Cucurbita pepo*) nas distâncias da faixa de aplicação aérea remota (ARR).

Distâncias (m)	Dias após exposição (DAE)									
	10		24		36		48		56	
	Doses (L ha ⁻¹)									
	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5
D1 – 40	25,0d	30,59ef	30,69d	35,51e	50,75de	60,50 d	69,50 g	68,00 g	74,25 f	73,00 g
D2 – 30	22,5f	30,84de	30,39de	33,29h	48,25 fg	77,63 a	70,75ef	81,12 b	78,75 c	86,63 b
D3 – 20	15,0h	36,70 a	30,59d	48,00a	56,00 b	76,25ab	78,88 a	83,34 a	82,63 a	88,63 a
D4 - 10**	14,5g	31,64 c	30,24e	33,5 h	46,50 g	69,75 c	71,50de	68,75 g	75,50 e	76,75 ef
D5 - 5,0*	15,0h	30,74 e	30,16e	35,01 f	49,75 ef	69,00 c	72,00 d	73,75 f	77,00 d	77,25 e
D6 - 0,0	30,3c	35,36 b	45,43a	43,00b	67,88 a	75,25 b	77,13 b	77,75 cd	79,88 b	81,13 d
D7 - 5,0*	31,8a	31,10 d	33,34b	39,25d	56,50 b	70,50 c	73,5 c	78,50 c	77,25 d	82,63 c
D8 - 10,0**	30,7b	30,28fg	31,61c	34,50 g	53,75 c	77,00 ab	70,25 fe	77,25 d	74,75 ef	89,38 a
D9 - 20,0	23,0e	30,29fg	31,65c	41,5 c	51,75 d	77,75 a	79,13 a	77,75cd	81,88 a	83,00 c
D10 -30,0	30,1c	30,34fg	30,69d	39,25 d	57,25 b	77,63 a	67,75 h	77,13 d	78,00cd	82,38 c
D11 -40,0	22,f	30,14g	31,65c	32,06i	49,75 ef	75,50 b	63,75 i	75,00 e	69,50 g	76,00 f

Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação. * 0,0 m = faixa central de pulverização do drone; ** = faixa de possível deriva a direita e a esquerda da faixa de cobertura.

Na avaliação do efeito da altura do voo do drone na ocorrência da deriva, em 10 DAA, ocorreu maior efeito de fitotoxicidade em 6,0 e 9,0 m de altura de voo na dose de 1,5 L ha⁻¹ (Tabela 4), enquanto em 3,5 L ha⁻¹ o maior efeito ocorreu em 9,0 m (Tabela 4). Em 24 DAA, a fitotoxicidade variou entre 30,53% (9,0 m) a 36,46% (3,0 m) e apesar da similaridade de valores ocorreu diferença significativa na altura de voo de 3,0 m, para a dose de 1,5 L ha⁻¹ e em 3,5 L ha⁻¹ a maior porcentagem de fitotoxicidade também ocorreu em 3,0 m (Tabela 4). Em 36 DAA, a maior

porcentagem de fitotoxicidade ocorreu em 12,0 m (60,14%) e em 3,5 L ha⁻¹ nos voos de 3,0 e 6,0 m altura (Tabela 4).

Em 48 e 56 dias após aplicação ocorreu padrão similar de fitotoxicidade descrito em 36 DAA (Tabela 4). A dose de herbicida tem influência no padrão de deriva do 2,4-D em função de altura de voo, sendo que em voos mais próximos do alvo e doses menores o potencial de dispersão de partículas pode ser maior, enquanto em doses maiores em voos de 12,0 m pode ocorrer maior potencial de deriva.

Tabela 4. Porcentagem (%) de efeito de fitotoxicidade do herbicida 2,4-D para planta bioindicadora abobora (*Cucurbita pepo*) na altura de voo da aplicação aérea remota (ARR).

Altura (m)	Dias após aplicação (DAA)									
	10		24		36		48		56	
	Doses (L ha-1)									
	1,5		3,5		1,5		3,5		1,5	
3,0	15,95 c	32,49 b	36,76 a	39,46 a	42,82 c	75,68 a	72,73 b	74,68 c	78,82 a	81,18 b
6,0	30,26 a	30,0 d	30,8 c	38,2 b	55,0 b	76,1 a	73,59 a	75,45 b	78,41a	79,18 c
9,0	30,34 a	32,8 a	30,3 c	39,3 b	55,2 b	71,14 b	69,68 c	72,32 d	75,32 c	79,27 c
12,0	19,38 b	30,68 c	31,74 b	33,46 c	60,14 a	70,45 b	72,77 b	82,41 a	76,32 b	86,45 a

Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação. * 0,0 m = faixa central de pulverização do drone; ** = faixa de possível deriva a direita e a esquerda da faixa de cobertura.

Para $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ as menores biometrias (massa seca, comprimento radicular e comprimento da parte aérea) ocorrem em 20,0 m a esquerda da faixa central de pulverização, diferindo significativamente das demais biomentrias realizadas (Figura 2). A menor biomassa fresca ocorreu em D3 (20 m) a direita da faixa de pulverização, diferindo significativamente das demais distâncias avaliadas (Figura 2).

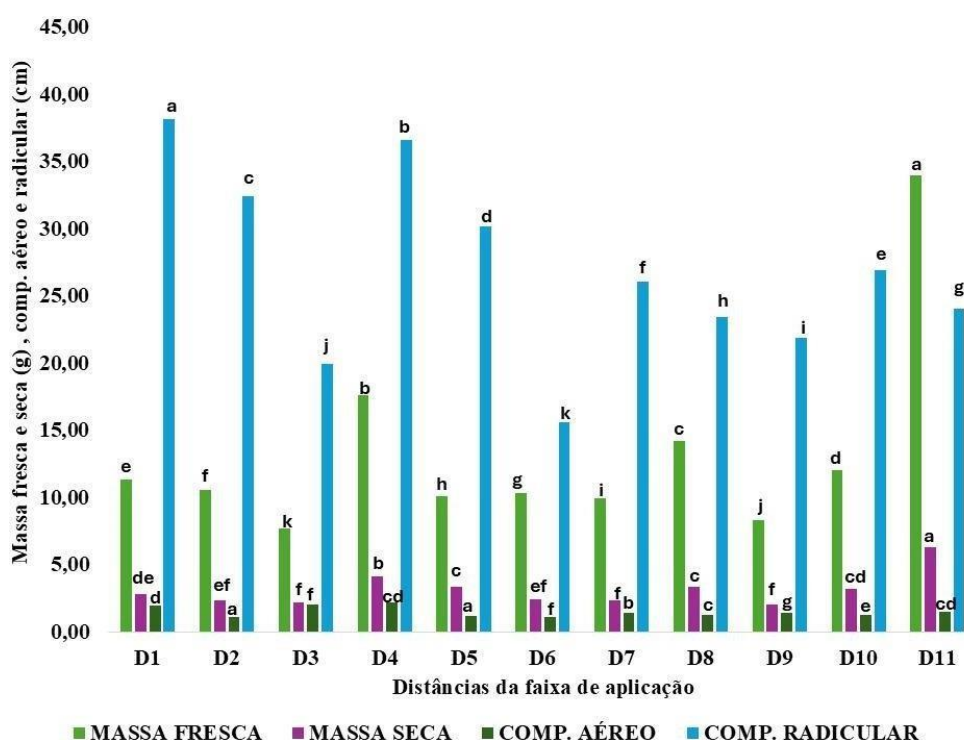


Figura 2. Biometria das plantas de abobora expostas a $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ do 2,4-D (T1).

Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação.

Para a dose de $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ o padrão de resposta foi similar a $1,5 \text{ L ha}^{-1}$, exceto a massa seca produzida não apresentou diferença significativa até D11 (40,0 m) a esquerda da faixa central (Figura 3) e para comprimento radicular que apresentou menor valor significativo em 30,0 m a direita da faixa central de pulverização (Figura 3).

Considerando o efeito nas variáveis biométricas em relação a faixa central de pulverização, verifica-se que ocorre efeito de deriva, com efeitos mensurados na abóbora até 40,0 m da area aplicada (Figura 2 e 3).

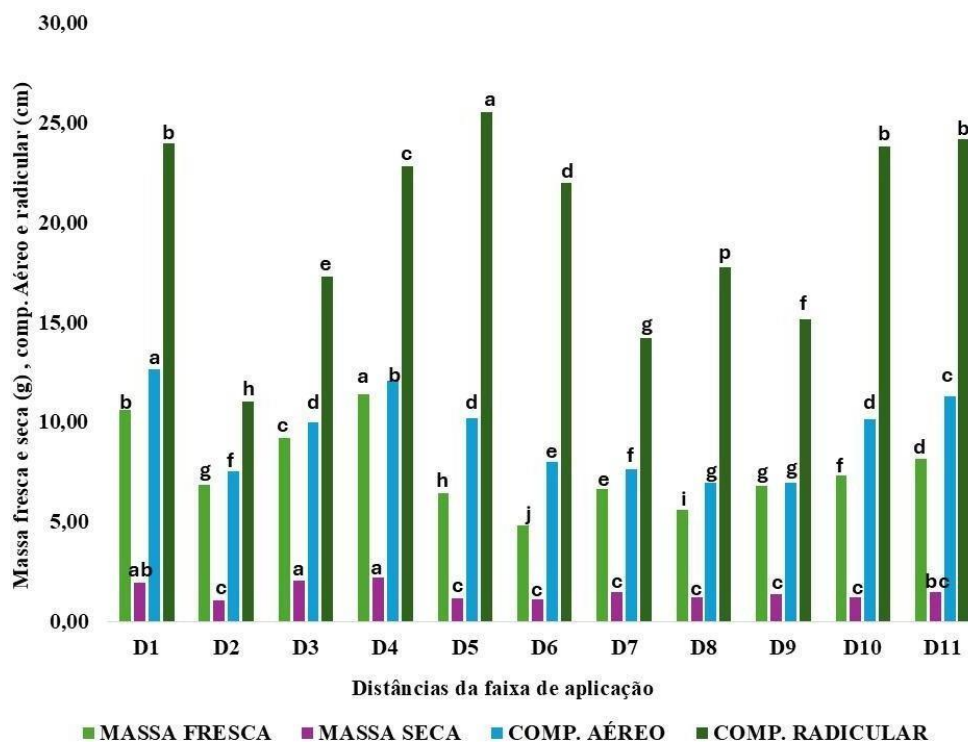


Figura 3. Biometria das plantas de abóbora expostas a 3,5 L ha⁻¹ de 2,4-D (T2).

Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação.

Após as análises de dados em relação às plantas de abóbora que ficaram expostas na faixa central de avaliação com a dose 1,5 L h⁻¹ apresentaram comprimento aéreo reduzido em relação as plantas que estavam fora da faixa de cobertura; na dose 3,5 L ha⁻¹ não ocorreu diferença significativa em relação às plantas ficaram fora da faixa de cobertura, assim como no estudo em que o 2,4-D nas concentrações (12 µM e 24 µM) causou efeito inibitório drástico no crescimento geral da planta de milho (*Zea mays*) (Martínez-de la Cruz et al., 2015).

No estudo que os autores (Brankov et al., 2023a,b; Brankov et al., 2024) desenvolveram, as doses de 0,14 à 1,16 g ha⁻¹ de dicamba promoveu redução de biomassa, altura, área foliar e injúria nas plantas bioindicadoras abóbora (*Cucurbita maxima*), e 1,3 g ha⁻¹ de mesotriona causou 80% de redução de biomassa da abóbora. O 2,4-D nas concentrações (12 µM e 24 µM) causou efeito inibitório drástico no crescimento geral da planta de milho (*Zea mays* L.) (Martínez-de la Cruz et al., 2015). Assim os resultados obtidos nos estudos acima demonstram a sensibilidade da planta após a exposição.

4.2. Sensibilidade e efeito de deriva para a planta bioindicadora alface

Para a planta teste alface (*L. sativa*), em 10 e 24 dias após a exposição (DAE) as doses 1,5 e 3,5 L ha⁻¹ apresentaram clorose foliar, crescimento e desenvolvimento irregular, perda de sustentação de folhas, alongamento caulinar, necrose caulinar e foliar (Tabela 5).

Na avaliação de 36 e em 54 DAE as plantas apresentaram clorose, crescimento e desenvolvimento irregular, alongamento caulinar, necrose caulinar e foliar e morte nas doses 1,5 L ha⁻¹ e 3,5 L ha⁻¹ (Tabela 5).

Tabela 5. Sinais de fitotoxicidade para a planta teste alface (*Lactuca sativa*) expostas de 2,4-D após aplicação aérea remota.

Sinais de Fitotoxicidade		10	24	36	56
1	Clorose (CI)	1*;&#;\$	1*;&#; e 2*;&#;\$	1*;&#;\$ e 2*;&#;\$	1*;&#;\$ e 2*;&#;\$
2	Crescimento/desenvolvimento irregular	1*;&#;\$ e 2*		1*;&#;\$ e 2*;&#;\$	1*;&#;\$ e 2*;&#;\$
3	Alongamento caulinar	SF	1# e 2&;	1# e 2&;\$	1#;\$ e 2&;#
4	Inibição de crescimento	SF	SF	SF	SF
5	Encarquilhamento de folhas	SF	SF	SF	SF
6	Perda de sustentação de folhas	1* e 2*	1*;&#; e 2*	1*;&#;	1*;&#;
7	Epinastia	SF	SF	SF	SF
8	Nódulos caulinares	SF	SF	SF	SF
9	Necrose nervuras foliares	SF	SF	SF	SF
10	Necrose caular e foliar	1*;&#;\$	1*;&#;\$ e 2&	1*;&#;\$ e 2*;&#;\$	1*;&#;\$ e 2*;&#;\$
11	Morte de plantas	SF	1*;&#;	1*;&#;\$ e 2*;&#;\$	1*;&#;\$ e 2*;&#;\$
Doses		1,5 L ha ⁻¹ (1)		3,5 L ha ⁻¹ (2)	
Altura (m)		3 *	6 &	9 #	12 \$

Alturas de voos: 3,0 m →(*); 6,0 m →(&); 9,0 m →(#); 12,0 m →(\$); SF = sem fitotoxicidade; Doses = 1 →(1,5 L ha⁻¹) e 2 →(3,5 L ha⁻¹).

Para a alface (*L. sativa*), em 10 dias após aplicação, na dose de 1,5 L ha⁻¹ em 5,0 e 10,0 m a esquerda da faixa central de pulverização, a porcentagem de fitotoxicidade ocorreu entre 60,94% e 65,00%, diferindo significativamente das demais distâncias avaliadas (Tabela 6). Para a dose de 3,5 L ha⁻¹ de 2,4-D a maior fitointoxicação ocorreu em 5,0 m a esquerda na faixa de cobertura, diferindo das demais distâncias (Tabela 6). Os principais sinais de fitotoxicidade foram clorose e necrose foliar e desenvolvimento irregular do caule.

Em 24 DAA, a maior porcentagem de fitointoxicação (91,25%) ocorreu em 10,0 m a esquerda da faixa central de pulverização, na dose de 1,5 L ha⁻¹, diferindo significativamente das demais distâncias avaliadas (Tabela 4). Na dose 3,5 L ha⁻¹ ocorreu 84,50% e 84,25% de fitotoxicidade em 5,0 m e 10,0 m a esquerda da faixa central de pulverização, diferindo significativamente das demais distâncias (Tabela 6).

Em 36 DAE, em 1,5 L ha⁻¹ de 2,4-D a porcentagem de fitotoxicidade ocorreu 10,0 m a esquerda da faixa central de pulverização, diferindo das demais distâncias avaliadas (Tabela 6). Em 3,5 L ha⁻¹ a maior fitotoxicidade ocorreu em 20,0 m a esquerda da faixa central. Nesta dose nas avaliações de 40,0 m a direita e a esquerda ocorreram 64,50% e 71,25% de fitotoxicidade respectivamente (Tabela 6), com sinais de clorose e necrose foliar e desenvolvimento irregular do caule. Este padrão de resposta da planta bioindicadora alface (*L. sativa*) foi mantido nas avaliações de 48 e 56 dias após exposição.

Na altura, todos os voos apresentaram efeito sobre o processo de deriva do 2,4-D, sendo que o voo a 3,0 m do alvo apresentou maior efeito de fitotoxicidade para a alface (*L. sativa*) na dose de 1,5 L ha⁻¹ em todas as avaliações (Tabela 6). O voo de 6,0 m apresentou similaridade ao voo de 3,0 m apenas em 10 dias após exposição, enquanto os voos de 9,0 e 12,0 m apresentaram os menores valores de fitotoxicidade em relação aos demais (Tabela 6). Para a dose 3,5 L ha⁻¹, os maiores valores de fitotoxicidade para a alface ocorreram em 10, 24, 48 e 56 dias após exposição, no voo de 6,0 m e em 48 DAE no voo de 12,0 m (Tabela 6).

Após a exposição na faixa central de aplicação as planta de alface apresentaram sensibilidade ao herbicida 2,4-D para duas doses, assim como no estudo dos autores (Bianchin Rebesquini et al., 2024), onde a menor causou

fitotoxicidade significativa às plantas, e a partir de 12,5% da dose recomendada de 2,4-D, os sinais de fitotoxicidade visuais foram superiores a 90%, promoveu também o desenvolvimento e o crescimento irregular das plantas.

Em um outro estudo a deriva de 2,4-D em mudas de alface (*Lactuca sativa*), em aplicações com 1% da taxa rotulada, promoveu 10% de lesão visual em 7 dias após o tratamento (DAT), com 8% da taxa rotulada promoveu 10% de lesão visual em 7 (Chen et al., 2020). No estudo que os autores (Van Rensburg, E., & Breeze, VG 1990) expõem as plantas de alface e tomate ao vapor do herbicida 14C 2,4-D butil, descobriram que a taxa de absorção da alface é menor que a taxa de absorção do tomate, após a exposição as plantas desenvolveram sintomas visíveis de fitotoxicidade, onde quantidade de vapor de herbicida recebida foi influenciada pela gravidade.

Tabela 6. Porcentagem (%) de efeito de fitotoxicidade do herbicida 2,4-D para planta bioindicadora alface (*L. sativa*) nas distâncias da faixa de aplicação aérea remota (ARR).

Distâncias (m)	Dias após exposição (DAE)									
	10		24		36		48		56	
	Doses (L ha ⁻¹)									
	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5
D1 - 40 m	30,19 c	30,09 e	31,43 f	32,06 i	39,31 i	64,50 i	66,50 i	57,00 i	80,25 f	69,75 h
D2 - 30 m	30,13 c	30,16 e	30,15 h	32,81 h	34,81 j	61,25 j	66,50 i	61,00 h	76,00 h	75,00 g
D3 - 20 m	30,08 c	30,18 e	30,14 h	35,50 g	45,50 h	75,00 e	71,75 g	76,50 e	83,00 e	85,50 d
D4 - 10 m**	30,18 c	30,15 e	30,18 h	36,31 f	39,25 i	72,50 f	67,75 h	68,25 f	77,25 g	78,00 e
D5 - 5,0 m*	30,16 c	30,33 e	30,59 g	36,50 f	46,50 g	67,57 h	76,50 e	66,00 g	88,00 d	76,75 f
D6 - 0,0 m	47,35 b	46,34 c	47,90 d	58,25 d	69,50 d	80,00 d	82,88 d	82,38 c	92,63 c	88,38 c
D7 - 5,0 m**	60,94 a	66,80 a	65,16 c	84,50 a	69,75 c	92,50 b	89,25 c	93,63 b	92,75 c	95,13 b
D8 - 10,0 m**	65,00 a	59,29 b	91,25 a	84,25 a	98,75 a	92,50 b	98,63 a	93,63 b	99,63 a	95,13 b
D9 - 20,0 m	52,06 b	54,88 b	70,00 b	68,25 b	80,50 b	96,75 a	92,63 b	94,88 a	97,63 b	97,63 a
D10 - 30,0 m	31,63 c	55,01 b	40,86 e	67,56 c	58,00 e	83,75 c	74,00 f	83,13 c	83,50 e	88,13 c
D11 - 40,0	22,86 d	37,76 d	30,21 h	50,01 e	51,75 f	71,25 g	74,50 f	77,75 d	79,25 f	84,63 d

Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação. * 0,0 m = faixa central de pulverização do drone; ** = faixa de possível deriva a direita e a esquerda da faixa de cobertura.

Tabela 7. Porcentagem (%) de efeito de fitotoxicidade do herbicida 2,4-D para planta bioindicadora alface (*Lactuca sativa*) na altura de voo da aplicação aérea remota (ARR).

Altura (m)	Dias após exposição (DAE)									
	10		24		36		48		56	
	Doses (L ha ⁻¹)									
	1,5		3,5		1,5		3,5		1,5	
3,0	45,85a	44,24b	57,76a	50,55c	65,00a	87,00a	83,45a	77,46b	90,73a	89,27a
6,0	44,47a	49,80a	45,75b	58,64a	58,82b	76,18c	76,41c	80,36a	88,32b	89,00a
9,0	37,85b	41,02c	40,02c	45,55d	55,77c	70,91d	73,64d	72,32c	83,00c	77,59c
12,0	28,39c	36,21d	37,51d	58,36b	50,82d	77,73b	79,55b	80,46a	83,36c	83,77c

Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação. * 0,0 m = faixa central de pulverização do drone; ** = faixa de possível deriva a direita e a esquerda da faixa de cobertura.

Para a pulverização de 1,5 L ha⁻¹ os menores valores biométricos significativos para a alface ocorreram em D9 (20,0 m) a esquerda da faixa central (Figura 4), equanto para 3,5 L ha⁻¹ ocorreu em D7 (5,0 m) dentro da faixa de cobertura de aplicação (Figura 5).

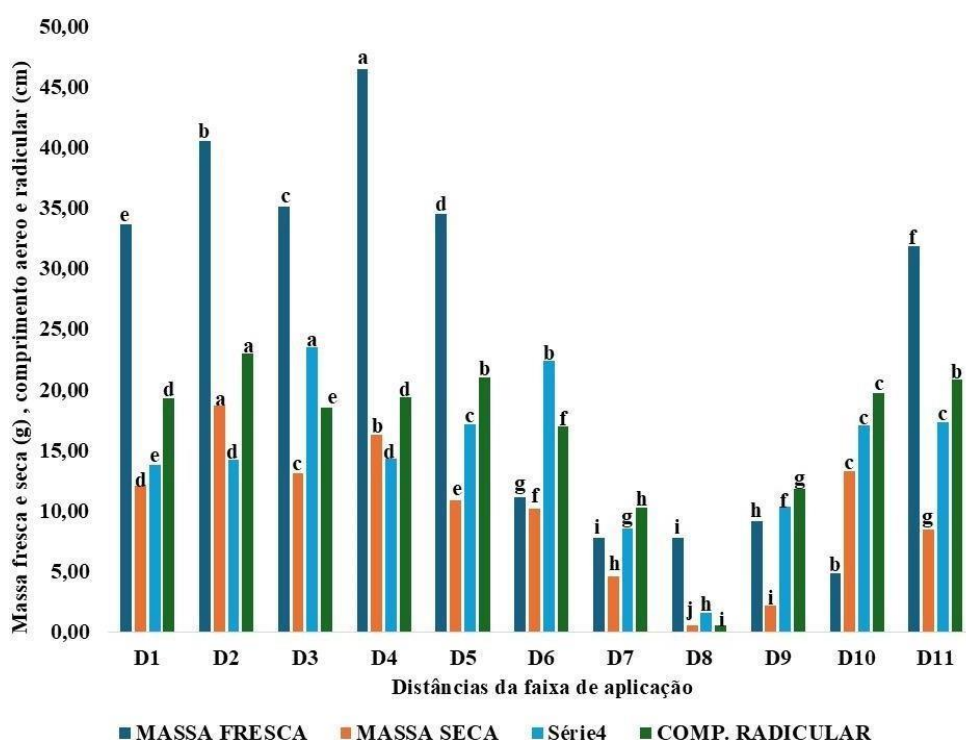


Figura 4. Biometria das plantas de alface expostas a 1,5 L ha⁻¹ de 2,4-D (T1).

Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação.

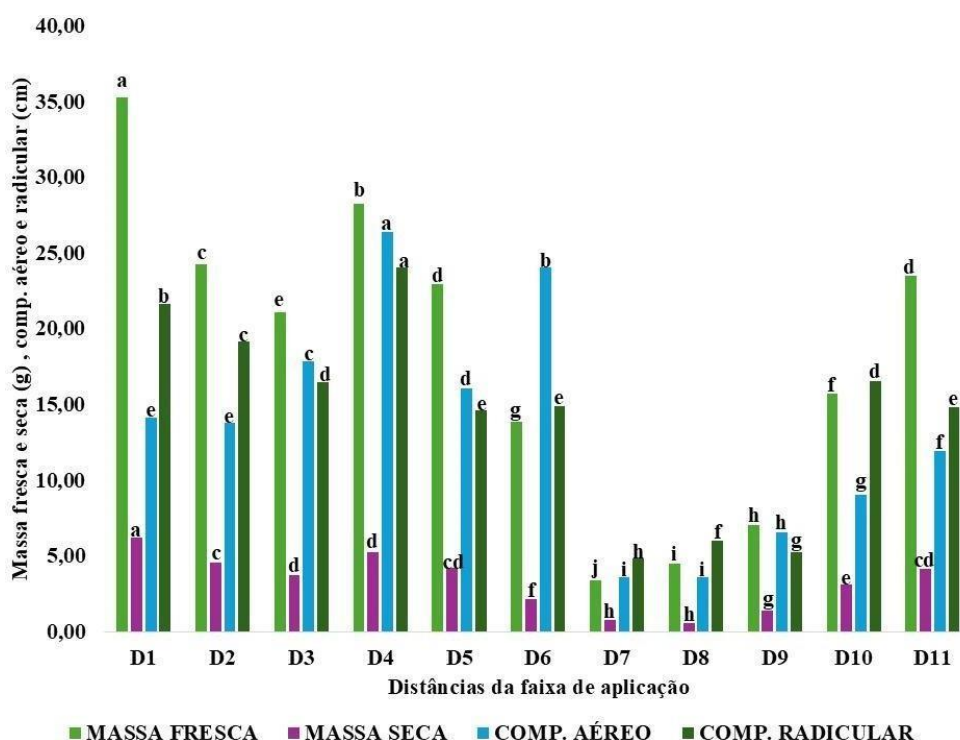


Figura 5. Biometria das plantas de alface expostas a $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ de 2,4-D (T2).

Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação.

Para Chen et al., (2020) com a utilização de 1,0% e 0,2% da taxa rotulada do herbicida 2,4-D, a alface apresentou 20 % de perda de rendimento com 1,0% da taxa rotulada; e 10% de perda rendimento na taxa de 0,2% da rotulada. Assim como neste estudo para (Chen et al., 2020) a alface apresentou sensibilidade ao herbicida 2,4-D. As doses de 500 ng de 2,4-D butil e superiores causam redução da biomassa (Van Rensburg, & Breeze, 1990).

As doses de 0,14 à $1,16 \text{ g ha}^{-1}$ dicamba promoveu redução de biomassa, altura, área foliar e injúria nas plantas bioindicadoras alface (*Lactuca sativa*). O herbicida mesotriona ($1,3$; $1,8$; e $116,0 \text{ g ha}^{-1}$) causou 80% de danos visuais na colza e alface (Brankov et al., 2023a,b; Brankov et al., 2024). Assim como neste estudo no trabalho dos autores citados acima o alface apresentou sensibilidade após a exposição.

4.3. Sensibilidade e efeito de deriva para a planta bioindicadora pepino

Em 10 dias após a exposição (DAE) as plantas de pepino (*C. sativus*) apresentaram clorose, crescimento e desenvolvimento irregular e epinastia na dose 1,5 L ha⁻¹ e epinastia ocorreu na dose 3,5 L ha⁻¹ (Tabela 7). Em 24 DAE ocorreu clorose nas doses 1,5 L ha⁻¹ (3,0 m) e 3,5 L ha⁻¹ (6,0 m e 9,0 m). Nesta avaliação também ocorreu crescimento e desenvolvimento, epinastia, necrose caulinar e foliar (Tabela 7). Em 36 DAE ocorreu clorose, crescimento e desenvolvimento irregular, encarquilhamento e epinastia de folhas e necrose calinar e foliar e morte das plantas (Tabela 7). Em 56 DAE a ocorrência dos sinais de fitotoxicidade foram semelhantes aos da avaliação de 36 DAE (Tabela 7).

Tabela 7. Sinais de fitotoxicidade para a planta teste pepino (*C. sativus*) expostas de 2,4-D após aplicação aérea remota.

Sinais de Fitotoxicidade		10	24	36	56
1	Clorose (CI)	1*	1* e 2&#	1*;&#;\$ e 2*;&#;\$	1*;&#;\$ e 2*;&#;\$
2	Crescimento/desenvolvimento irregular	1*	1* e 2*	1*;&#;\$ e 2*;&#;\$	1*;&#;\$ e 2*;&#;\$
3	Alongamento caulinar	SF	SF	SF	SF
4	Inibição de crescimento	SF	SF	SF	SF
5	Encarquilhamento de folhas	SF	1*	1*	1*
6	Perda de sustentação de folhas e ramos	SF	SF	SF	SF
7	Epinastia	1* 2&#	1* e 2&#	1* e 2&\$	1*; e 2&\$
8	Nódulos caulinares	SF	SF	SF	SF
9	Necrose nervuras foliares	SF	SF	SF	SF
10	Necrose caular e foliar	SF	1*	1*;&#;\$ e 2*;&#;\$	1*;&#;\$ e 2*;&#;\$
11	Morte de plantas	SF	SF	1*	1*
Doses		1,5 (1)		3,5 (2)	
Altura (m)		3*	6 &	9 #	12 \$

Alturas de voos: 3,0 m →(*); 6,0 m →(&); 9,0 m →(#); 12,0 m →(\$); SF = sem fitotoxicidade; Doses = 1 →(1,5 L ha⁻¹) e 2 →(3,5 L ha⁻¹).

Para o pepino (*C. sativus*), em 10 DAE, na dose de 1,5 L ha⁻¹ a maior fitotoxicidade ocorreu em todas as avaliações na faixa central de pulverização (Tabela 8) e para 3,5 L ha⁻¹ ocorreu em 10 dias após exposição (Tabela 8).

Após 24, 36 dias após exposição, para 3,5 L ha⁻¹ a maior fitotoxicidade

ocorrem em 40,0 m a esquerda da pulverização e em 48 e 56 DAE foi na distância de 5,0 m a esquerda da faixa central de pulverização, todas diferindo significativamente das demais distâncias avaliadas (Tabela 8).

Nas avaliações de 40,0 m a direita da faixa de pulverização, na dose de 1,5 L ha⁻¹, ocorreu aumento da fitointoxicação da planta bioindicadora pepino entre 15,03% (10 DAE) e 62,88% (56 DAE) e para 3,5 L ha⁻¹ de 22,91% (10 DAE) e 70,38% (56 DAE) e na esquerda, em 1,5 L ha⁻¹, entre 30,35% (10 DAE) e 59,50% (56 DAE) e para 3,5 L ha⁻¹ de 22,84% (10 DAE) e 75,13% (56 DAE) (Tabela 8). Os resultados indicam

Após a compração final dos dados nas doses 1,5 L ha⁻¹ e 3,5 L ha⁻¹ os resultados apresentaram sinais de fitotoxicidade graves com crescimento e desenvolvimento irregular, epinastia e necrose culinar e foliar, esses resultados indicam a sensibilidade da planta *C. Sativus* ao herbicida 2,4-D.

A deriva do 2,4-D para cultura da seringueira, promoveu sintomas característicos que iniciaram com murcha e enrugamento das folhas jovens e, nas doses mais elevadas, progrediram rapidamente para clorose, epinastia caulinar e necrose das bordas, enquanto as folhas maduras apresentaram coloração marrom (Zoz et al., 2025). Os resultados obtidos nos estudos citados apresentam resultados semelhantes aos avaliados neste estudo, demonstrando a sensibilidade das plantas ao herbicida 2,4-D.

Assim como no estudo que utilizou solos tratados com o herbicida dicamba (usados em ensaios de volatilidade), para teste de emergência de plântulas de *C. sativus*, as plântulas que emergiram no solo tratado com doses superiores a 90 g ha⁻¹ também apresentaram crescimento e desenvolvimento irregular, os resultados do estudo apresenta a sensibilidade da planta de pepino após a exposição direta ao herbicida (Pereira et al., 2025). Os resultados dos estudos demonstram a sensibilidade da planta *C. sativus* aos herbicidas utilizados nos estudos.

Tabela 8. Porcentagem (%) de efeito de fitotoxicidade do herbicida do 2,4-D para planta bioindicadora pepino (*Cucumis sativus*) nas distâncias da faixa de aplicação aérea remota (ARR).

Distâncias (m)	Dias após exposição (DAE)									
	10		24		36		48		56	
	Doses (L ha ⁻¹)									
	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5
D1 – 40	15,03 g	22,91 e	47,58 c	30,99 h	52,88 e	62,00 d	60,88 f	68,00 e	62,88 g	70,38 g
D2 – 30	32,55 b	30,13 d	31,68 f	33,00 e	52,75 e	60,75 e	62,00 f	67 25 e	72,38 e	78,00 c
D3 - 20	30,11 e	30,19 d	30,19 h	33,00 e	47,50 g	64,50 b	69,50 e	70,50 d	78,00 c	79,00 bc
D4 - 10**	22,56 f	30,36 cd	31,36 f	34,35 c	42,50 i	63,25 c	51,00 h	74,50 b	64, 25 f	80,00 b
D5 - 5,0*	30,09 e	30,44 cd	52,81 a	34,25 c	74,63 a	65,25 b	79,63 a	70,50 d	86,88 a	76,50 d
D6 - 0,0	30,08 e	36,41 a	37,50 e	38,81 b	66,38 b	65,00 b	71,63 cd	71,25 d	76,13 d	73,25 f
D7 - 5,0*	33,84 a	30,83 b	35,50 d	33,31 e	50,00 f	67,50 a	72,25 c	78,75 a	79,25 b	84,25 a
D8 - 10,0**	31,56 c	30,80 b	48,81 b	33,75 d	60,13 c	45,75 h	70,63 de	63,75 f	76,63 d	69,25 h
D9 - 20,0	31,18 d	30,59 bc	30,74 g	31,81 g	56,25 d	49,00 g	75,75 b	55,50 h	79,75 b	59,25 j
D10 - 30,0	30,14 e	22,81 e	30,36 h	32,34 f	44,00 h	54,75 f	53,50 g	56,75 g	65,00 f	64,75 i
D11 - 40,0	30,35 e	22,84 e	31,58 f	43,81 a	40,50 j	67,75 a	52,75 g	72,50 b	59,50 h	75,13 e

Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação. * 0,0 m = faixa central de pulverização do drone; ** = faixa de possível deriva a direita e a esquerda da faixa de cobertura.

Para a altura de voo do drone, na pulverização de 1,5 L ha⁻¹ o maior efeito de deriva ocorreu em 3,0 m de altura nos dias 10 e 24 após exposição, e no voo de 9,0 m em 36, 48 e 56 DAE as plantas apresentaram maior fitotoxicidade (Tabela 9).

Em 3,5 L ha⁻¹ as alturas de voos que ocorreu maior deriva nos respectivos dias de avaliações foram: no voo de 9,0 m em 10 e 24 DAE, com 12,0 m em 36 DAE e no voo de 6,0 m em 48 e 56 (Tabela 9).

Tabela 9. Porcentagem (%) de efeito de fitotoxicidade do herbicida do 2,4-D para planta bioindicadora pepino (*Cucumis sativus*) na altura de voo da aplicação aérea remota (ARR).

Altura (m)	Dias após exposição (DAE)									
	10		24		36		48		56	
	Doses (L ha ⁻¹)									
	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5
3,0	32,63a	27,43c	40,07a	34,69b	53,46b	60,23b	69,55b	68,28b	75,18b	71,77c
6,0	25,24d	30,12b	37,63c	32,52c	51,82c	59,32c	61,00c	71,23a	73,46c	77,55a
9,0	30,22b	30,69a	39,76b	38,33a	60,05a	57,59d	75,14a	66,23c	80,18a	73,55b
12,0	27,36c	27,53c	30,94d	32,43c	48,32d	64,86a	55,96d	66,77c	62,32d	71,59c

Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação. * 0,0 m = faixa central de pulverização do drone; ** = faixa de possível deriva a direita e a esquerda da faixa de cobertura.

A massa fresca das plantas de pepino nas distâncias D1, D5 e D9 (3,86g-3,81g-3,88g) não diferiram, as D4 e D10 (9,15g-9,05g) foram semelhantes. Na massa seca as D1 e D6 (1,30g-1,24g) não diferiram, nas D5 e D9 (1,02g-1,02g) foram semelhantes, as D8 e D11 (1,44g-1,46g) não diferiram. O comprimento aéreo apresentou semelhança nas distâncias D1 e D7 (11,33cm-11,13cm), nas D2 e D6 (9,88cm-9,56cm) não diferiram, as D8 e D9 (12,81cm-12,63cm) foram semelhantes.

No comprimento radicular as distâncias D1 e D11 (16,88cm-16,88cm) não diferenciaram, as D4, D9 e D10 (17,31cm-17,31cm-17,56cm) foram similares (Figura 6).

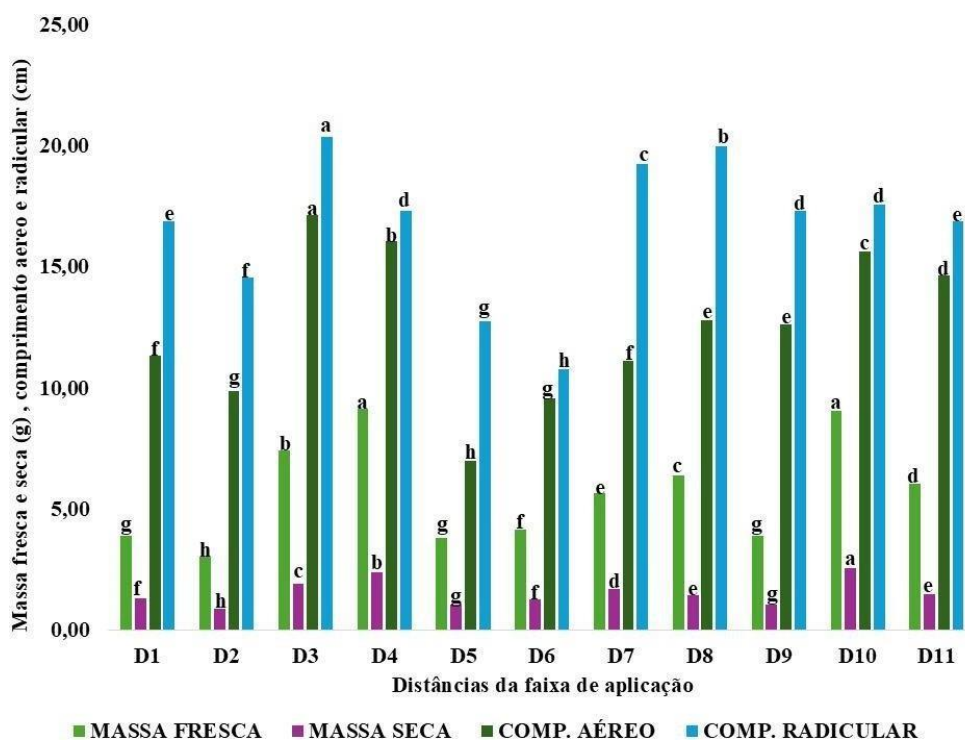


Figura 6. Biometria das plantas de pepino expostas a $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ de 2,4-D (T1).

Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação.

Na massa fresca as distâncias D1, D2, D7 e D8 (2,89g-2,73g-2,74g-2,80g) foram semelhantes, a D3 (2,71g) não diferiu das D2. D7 e D8, as D4 e D11 (2,07g-2,12g) foram similares. A massa seca nas D1 e D8 (0,64g-0,62g) não diferiram, as D2 e D3 (0,64g-0,72g) foram semelhantes, D6, D7 e D11 (0,52g-0,54g-0,53g) não diferiram. No comprimento aéreo as distâncias D1 e D4 (11,63cm-11,69cm) foram semelhantes, e não diferiram de D7 (11,83g), D3 (12,13g) foi semelhante a D7. No comprimento radicular não houve semelhança (Figura 7).

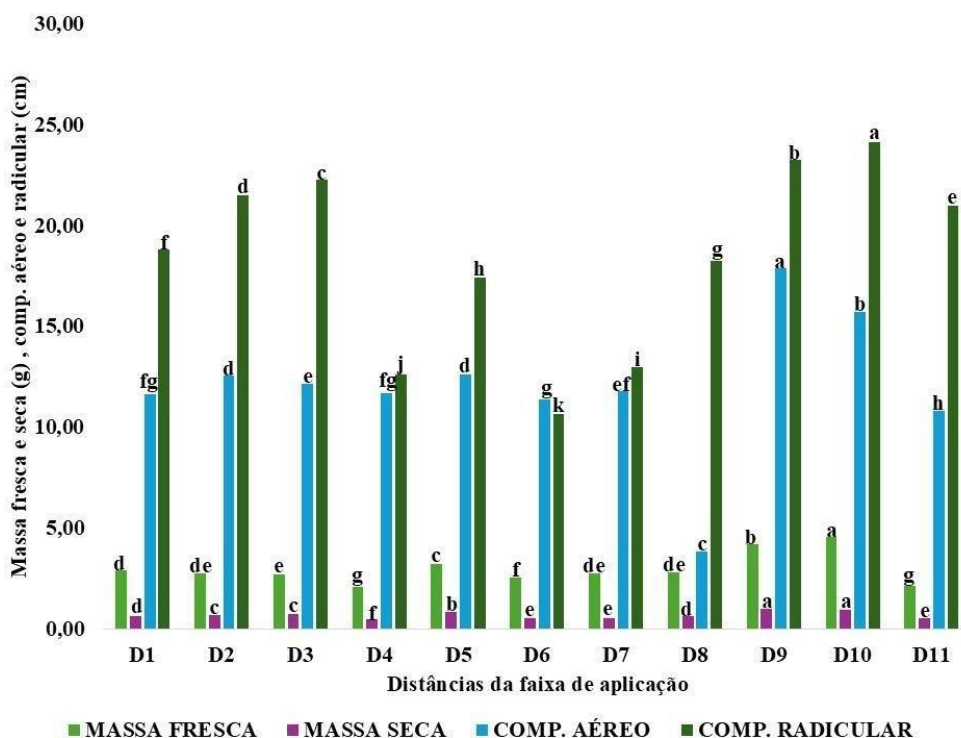


Figura 7. Biometria das plantas de pepino expostas a $3,5 \text{ L ha}^{-1}$ de 2,4-D (T2).

Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação.

As plantas de pepino após a exposição na faixa central de avaliação, para $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ e $3,5 \text{ L ha}^{-1}$, apresentam sensibilidade ao herbicida 2,4-D. Assim como no estudo em que os autores (Hand et al., 2021) observaram durante o período experimental que concentrações baixas de 2,4-D causaram fitotoxicidade as plantas de pepino, com redução do comprimento da planta, onde a redução de crescimento e as lesões foram maiores em plantas mais jovens, e os autores (Konate et al., 2017) também observaram redução da biomassa (fresca e seca) na planta de pepino.

4.4. Sensibilidade e efeito de deriva para a planta bioindicadora tomate

Para as plantas de tomate a frequência de ocorrência dos sinais de fitotoxicidade foram variadas, sendo de acordo com a dose e altura de voo, assim os dados estarão referenciando as doses e alturas de voo em que houve ocorrência dos sinais de fitotoxicidades nas plantas. Em 10 DAE ocorreu clorose, crescimento e desenvolvimento irregular, encarquilhamento de folhas e ramos, epinastia, nódulos caulinares (Tabela 10). Em 24 DAE ocorreu clorose foliar, crescimento e desenvolvimento irregular, encarquilhamento e epinastia, encarquilhamento de

folhas, nódulos caulinares, necrose nas nervuras foliar e morte de plantas (3,5 L ha⁻¹). Em 36 DAE a ocorrência de clorose, crescimento e desenvolvimento irregular, inibição de crescimento e encarquilhamento de folhas (Tabela 10).

Na avaliação de 56 DAE ocorreu clorose, crescimento e desenvolvimento irregular, sinais de inibição de crescimento, encarquilhamento de folhas e epinastia foliar (Tabela 10).

Tabela 10. Porcentagem (%) de efeito de fitotoxicidade do herbicida do 2,4-D para planta bioindicadora tomate (*S. lycopersicum*) nas distâncias da faixa de aplicação aérea remota (ARR).

Sinais de Fitotoxicidade		10	24	36	56
1	Clorose (Cl)	1*	1* e 2*	1*;&#;\$ e 2*;&#;\$	1*;&#;\$ e 2*;&#;\$
2	Crescimento/desenvolvimento irregular	1*;\$	1* e 2*	1*;&#\$ e 2*;&#	1*;&#\$ e 2*;&#;\$
3	Alongamento caulinar	SF	SF	SF	SF
4	Inibição de crescimento	SF	SF	1\$	1\$
5	Encarquilhamento de folhas	1* e 2*;&#	1* e 2*;&#	1*;&#\$ e 2*;&#;\$	1*;&#\$ e 2*;&#;\$
6	Perda de sustentação de folhas e ramos	SF	SF	SF	SF
7	Epinastia	1\$ e 2*;&#	1* e 2*;&#	2*;&#;\$	2*;&#;\$
8	Nódulos caulinares	1*	1*	1*;	1* e 2&
9	Necrose nervuras foliares	SF	2*	2*;&#;\$	2*;&#;\$
10	Necrose caular e foliar	SF	SF	2#	2#;
11	Morte de plantas	SF	2*	1*;&# e 2*;&#;\$	1*;&# e 2*;&#;\$
Doses		1,5 L há ⁻¹ (1)		3,5 L há ⁻¹ (2)	
Altura (m)		3*	6 &	9 #	12 \$

Alturas de voos: 3,0 m →(*); 6,0 m →(&); 9,0 m →(#); 12,0 m →(\$); SF = sem fitotoxicidade; Doses = 1 →(1,5 L ha⁻¹) e 2 →(3,5 L ha⁻¹).

Para o tomate (*Solanum, lycopersicum*), em 10 dias após exposição, as maiores porcentagens de fitotoxicidade ocorreram 10,0 m (1,5 L ha⁻¹) e 5,0 m (3,5 L ha⁻¹) a esquerda da faixa central de pulverização (Tabela 11). Nas demais avaliações, para as duas doses pulverizadas os maiores valores de fitointoxicidade ocorreram a 10,0 m a esquerda na faixa central, diferindo significativamente das demais distâncias avaliadas (Tabela 11).

Na avaliação de 40,0 m a direita da faixa de aplicação, na dose 1,5 L ha⁻¹ ocorreu 22,59% de fitotoxicidade em 10 DAE e 77,50% em 56 DAE e para 3,5 L ha⁻¹ ocorreu 30,21% de em 10 DAE e 74,00% em 56 DAE (Tabela 8). A esquerda da faixa de aplicação, na dose 1,5 L ha⁻¹ ocorreu 47,86% de fitointoxicação em 10 DAE e 79,88% em 56 DAE e para 3,5 L ha⁻¹ ocorreu 25,79% em 10 DAE e 76,75% em 56 DAE (Tabela 11).

Neste estudo os dados obtidos demonstraram que após a exposição na faixa central de avaliação, com a 1,5 e 3,5 L ha⁻¹ as plantas de tomate apresentaram sintomas de fitotoxicidade graves, em outros estudos o 2,4-D promoveu efeito fitotóxico na planta de tomate semelhantes aos encontrado neste estudo, os quais apresentando sinais de fitotoxicidade como: encurvamento, distorção e folhagem subdimensionada, epinastia e atrofiamento do caule, as pontas dos folíolos foram mais agudamente afiladas e órgãos florais abortados (Warmund, Ellersieck & Smeda 2022) apresentou também a formação de calos no caule (Martínez-de la Cruz et al., 2015).

No estudo que os autores conduziram (Hermes et al. 2020) os sintomas de lesão por deriva de 2,4-D no tomate (*S. lycopersicum*) incluíram epinastia, distorção foliar, caules divididos com iniciais de raiz salientes e frutos malformados com maturidade retardada (Baurle et al., 2017). Assim a gravidade da lesão do tomate (*Lycopersicon esculentum*) depende da dose do herbicida e do estágio de crescimento da planta no momento da exposição.

Após a exposição do tomate que estava na fase de transição do estágio vegetativo para o reprodutivo às doses de 1,8 a 2,1 g ha⁻¹ de 2,4-D, as plantas apresentaram frutos malformados, atrasos na maturidade dos frutos e redução da produção total da cultura (Hemphill et al., 1981). Em outro estudo em que os autores exporaram as plantas de alface e tomate ao vapor do herbicida 14C 2,4-D butil, a taxa de absorção do tomate foi maior que a taxa de absorção da alface, após a

exposição das plantas foi observado sintomas de fitotoxicidade (Van Rensburg, & Breeze, 1990). De acordo com os dados apresentados é possível afirmar que o tomate apresenta sensibilidade ao herbida 2,4-D.

Tabela 11. Porcentagem (%) de efeito de fitotoxicidade do herbicida 2,4-D para planta bioindicadora tomate (*S. lycopersicum*) nas distâncias da faixa de aplicação aérea remota (ARR).

Distâncias (m)	Dias após exposição (DAE)									
	10		24		36		48		56	
	Doses (L ha ⁻¹)									
	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5
D1 - 40	22,59 g	30,21 f	36,76 i	36,40 f	41,53 h	63,00 f	74,75 e	66,50 f	77,50 e	74,00 f
D2 - 30	22,66 g	30,18 f	37,55 h	30,20 h	45,55 h	59,00 j	73,25 f	65,25 g	74,75 f	68,75 h
D3 – 20	22,56 g	15,20 i	32,78 j	30,36 h	42,00 i	62,50 g	71,00 g	65,75 fg	73,50 g	70,50 g
D4 - 10**	22,59 g	30,46 f	40,03 g	33,93 g	45,53 h	60,00 i	63,39 i	63,25 h	64,26 i	71,00 g
D5 - 5,0*	22,81 g	22,60 h	45,08 f	22,65 i	50,00 g	56,25 k	66,25 h	62,00 i	69,25 i	66,75 i
D6 - 0,0	52,58 b	36,34 e	74,25 b	49,13 e	76,25 d	67,50 d	87,25 c	72,88 e	88,25 c	73,63 f
D7 - 5,0*	48,83 d	48,88 a	74,50 b	81,88 b	78,75 b	87,50 c	87,25c	88,63 c	88,25 c	90,13 c
D8 - 10,0**	63,76 a	46,25 c	83,75 a	86,00 a	95,00 a	92,50 a	97,13 a	93,63 a	98,88 a	95,13 a
D9 - 20,0	51,59 c	47,50 b	60,50 c	78,76 c	77,00 c	91,35 b	88,88 b	92,50 b	93,38 b	93,25 b
D10 - 30,0	23,20 f	45,29 d	46,76 e	50,28 d	59,53 f	66,25 e	75,25 e	80,00 d	79,25 d	85,25 d
D11 - 40,0	47,86 e	25,79 a	58,01 d	36,55 f	63,50 e	61,25 h	78,38 d	73,25 e	79,88 d	76,75 e

Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação. * 0,0 m = faixa central de pulverização do drone; ** = faixa de possível deriva a direita e a esquerda da faixa de cobertura.

Em 10 DAE os maiores valores de fitotoxicidade ocorreram em 9,0 m de altura do alvo, nas duas doses pulverizadas. Em 24 e 48 DAE para 1,5 L ha⁻¹ os maiores valores ocorreram no voo de 3,0 m e em 56 DAE no voo de 3,0 m de altura do alvo (Tabela 12). Para a dose de 3,5 L ha⁻¹ no voo de 9,0 m em 10 DAE e de 12,0 m de altura em 24, 36, 48 e 56 dias após exposição (Tabela 12).

Tabela 12. Porcentagem (%) de efeito de fitotoxicidade do herbicida do 2,4-D para planta bioindicadora tomate (*Solanum lycopersicum*) na altura de voo da aplicação aérea remota (ARR).

Altura (m)	Dias após exposição (DAE)									
	10		24		36		48		56	
	Doses (L ha ⁻¹)									
	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5
3,0	47,70b	26,48d	64,56a	46,34c	68,01b	64,55d	85,73a	70,09d	89,09a	77,18b
6,0	39,30c	34,64c	56,02c	50,27b	62,64c	65,04c	80,09c	71,05c	81,73c	74,14c
9,0	47,90a	41,14a	58,64b	42,74d	71,00a	68,45b	83,73b	73,36b	85,82b	77,09b
12,0	10,93d	35,45b	35,32d	55,60a	45,13d	80,91a	64,19d	85,00a	65,96d	86,18a

Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação. * 0,0 m = faixa central de pulverização do drone; ** = faixa de possível deriva a direita e a esquerda da faixa de cobertura.

Na avaliação do efeito da aplicação de 1,5 L ha⁻¹ de 2,4-D em 30 m (D2) a direita da faixa central de pulverização a biomassa fresca e seca apresentaram maior valor, diferindo significativamente das demais distâncias avaliadas, enquanto a menor biomassa fresca e seca ocorreu em 10,0 m (D8) a esquerda da faixa central de pulverização (Figura 8). Os menores comprimentos radiculares e comprimento da parte aérea também ocorreram em 10,0 m (D8) a esquerda (Figura 8). Os valores de biometria final do tomate (*S. lycopersicum*) demonstram que ocorreu maior efeito de deriva a esquerda da faixa central de pulverização do drone.

Para 3,5 L ha⁻¹ as menores mensurações de biomassa fresca, massa seca, comprimento radicular e comprimento da parte aérea ocorreram em 10,0 m (D8) e 20,0 m (D9) a esquerda da faixa central de pulverização (Figura 9), sendo significativamente menores do que as demais distâncias avaliadas.

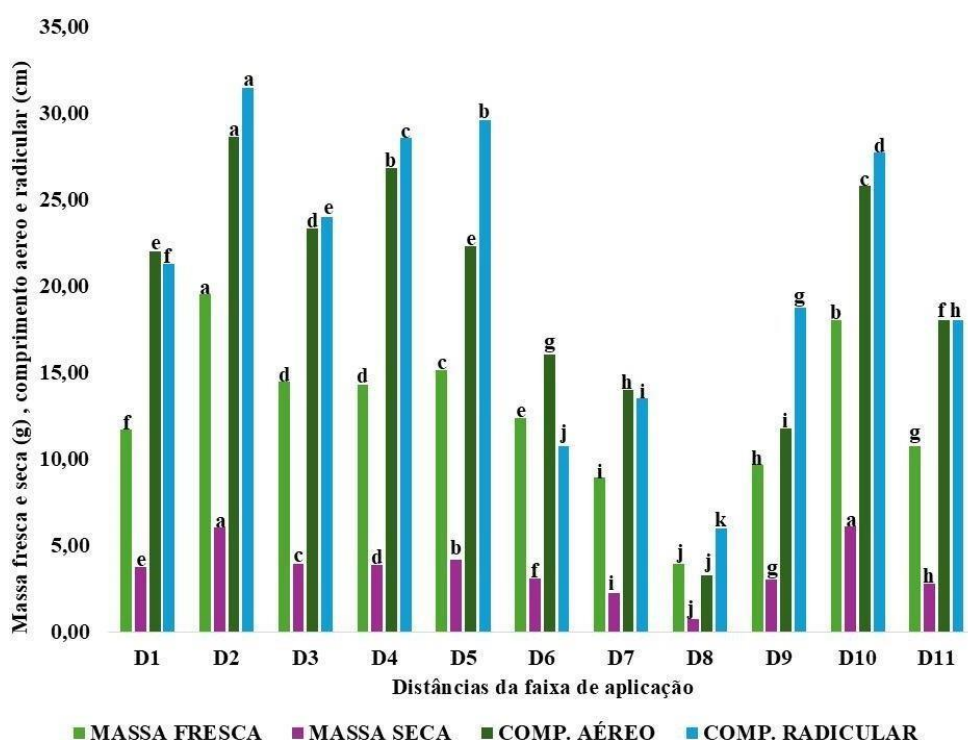


Figura 8. Biometria das plantas de tomate expostas a 1,5 L ha⁻¹ de 2,4-D (T1).

Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação.

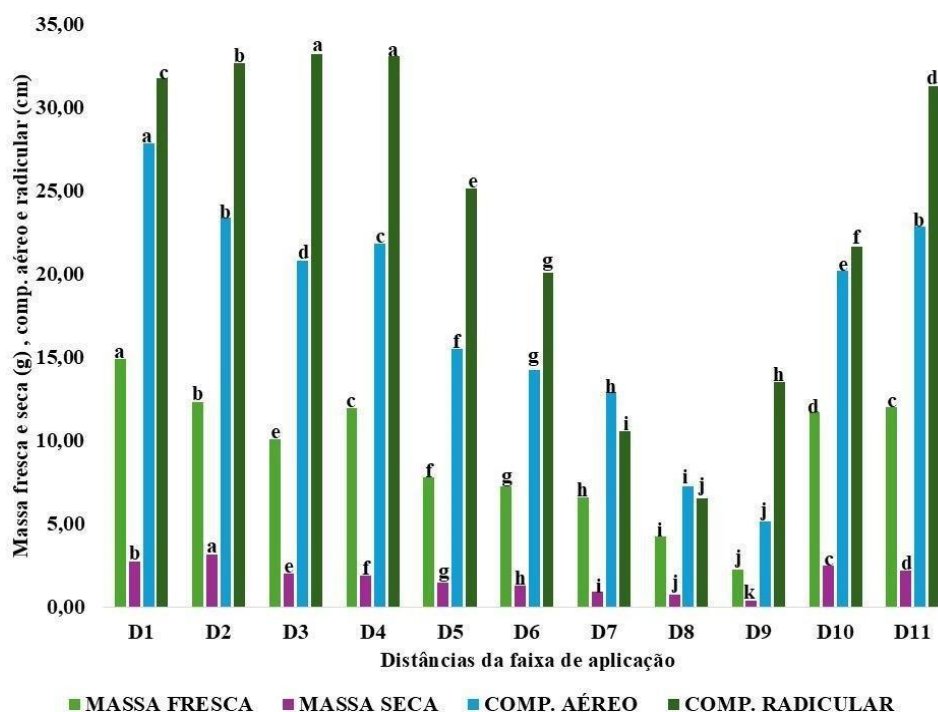


Figura 9. Biometria das plantas de tomate expostas a 3,5 L ha⁻¹ de 2,4-D (T2). Letras na coluna indicam diferença significativa entre as distâncias de pulverização a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey (5%). Distâncias D1, D2, D3, D4, D5 representam o lado direito após a faixa central de aplicação, as distâncias D7, D8, D9, D10, D11 representam o lado esquerdo após a faixa central de aplicação e a distância D6 representa a faixa central de aplicação.

As plantas exposta ao herbicida dentro e fora da faixa de cobertura na dose 3,5 L ha⁻¹ apresentaram biometria menores que as plantas expostas a dose 1,5 L ha⁻¹ no entanto as plantas apresentaram comprimento radicular menores que as exposta a dose 1,5 L ha⁻¹, assim como neste estudo os autores Van Rensburg, E., & Breeze, 1990) encontraram resultados indicando que 250 ng do herbicida 2,4-D butil promoveu uma redução de 10% na produção de brotos; e a concentração 1000 ng promoveu redução de 20%. No estudo do autor (Bennet, 1988) a planta de tomate após a exposição ao herbicida 2,4-D nas concentrações 1 ~g IA e 1 000 ~g IA apresentaram resultados que indicaram o aumento no crescimento das plantas.

No estudo dos autores Van Rensburg, & Breeze, 1990) os resultados indicaram que 250 ng do herbicida 2,4-D butil promoveu uma redução de 10% na produção de brotos; e a concentração 1000 ng promoveu redução de 20%. A deriva de herbicidas pode reduzir o crescimento e o rendimento do tomate e de outras plantas. Os herbicidas dicamba, glufosinato, glifosato, lactofen e paraquat, promoveram 33% de redução no rendimento do amendoim, quando expostos aos herbicidas no estágio de crescimento R3 (Singh et al., 2024).

As doses de 0,14 à 1,16 g ha⁻¹ de dicamba promoveu redução de biomassa, altura, área foliar e injúria nas plantas bioindicadoras colza (*Brassica napus*), pimenta (*Capsicum annuum*), soja (*Glycine max*), girassol (*Helianthus annuus*) e tomate (*Solanum lycopersicum*). As doses 0,48 e 3840,0 g ha⁻¹ de glifosato reduziu o crescimento de todas as plantas citadas acima. O herbicida mesotriona com a dose 1,3 g há causou 80% de redução de biomassa do tomate (Brankov et al., 2023a,b; Brankov et al., 2024).

Na comparação final dos dados obtidos para as doses 1,5 e 3,5 L ha⁻¹, os resultados indicaram que as plantas bioindicadoras utilizadas neste estudo apresentaram excelentes respostas à deriva na faixa de cobertura da pulverização. Após a comparação final das alturas de voo em relação ao alvo de pulverização, as alturas que mais influenciaram no processo de deriva e camnhamento de partículas na concentração 1,5 L ha⁻¹ para a abóbora foram, 3,0 e 6,0 m, para a alface 3,0 m, para o pepino 9,0 m e para o tomate 3,0 m, enquanto na concentração 3,5 L ha⁻¹ para a abóbora e para o tomate foi a altura de 12,0 m, para a alface 3,0 m e para o pepino 6,0 m de altura de voo do drone em relação ao alvo que mais influenciaram.

A eficiência da pulverização e a deposição uniforme das gotas dependem de vários parâmetros de aplicação, incluindo altura de voo, velocidade e direção de vento, temperatura e umidade relativa (Meesaragandla, S., et al., 2024). Outro estudo afirma que a eficiência da aplicação de herbicidas é diretamente impactada pelo tamanho da gota, concentração e volume de pulverização (Kieloch, & Domaradzki, K. 2013).

De acordo com os autores (Meesaragandla et al., 2024). para que ocorra um bom desempenho da pulverização, é necessário que haja um equilíbrio entre a altitude e a velocidade de voo do drone (Wang et al., 2020). Assim quando a direção do vento é instável e excede uma velocidade de 4m/s, a distribuição de gotas torna-se desuniforme, assim como a altura de voo influencia na largura (faixa) de deposição de gotas (Liao et al., 2019).

Outro estudo demonstra que a velocidade do voo não influenciam na largura da faixa de deposição (Martin, 2019), e que a altura de pulverização também determina a evaporação das gotas à medida da sua progressão de 1,5m para 4,0m antes de atingir o alvo, outros fatores como o vento lateral e a trajetória de voo, podem impedir a deposição da gota no alvo (Meesaragandla et al., 2024). Assim os algoritmos e as tecnologias de inteligência artificial são capazes de retificar tais influências e manter a estabilidade da aeronave às condições flutuantes do vento e da topografia (Wang, 2019).

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

As plantas abóbora, alface, pepino e tomate utilizadas como bioindicadores apresentam sensibilidade ao herbicida 2,4-D, podendo ser empregadas em programas e estudos de avaliação de deriva de aplicação aérea remota (AAR).

Os sinais de fitotoxicidade das quatro plantas indicadoras demonstram que a AAR apresenta efeito de deriva para o herbicida 2,4-D, em função da dose e da altura de voo, sendo que para dose menor os efeitos são mais evidentes em voos com menor altura em relação ao alvo e para a maior dose voos em maiores alturas.

6. REFERÊNCIAS

- Aires, E. S., Aragão, C.A., Marinho, L. B., Gomes, L. L. S., Oliveira, A.B.N., Yuri, J. E. (2020), "Performance of crisphead lettuce cultivares under protected environment in different times of production". **Revista Ceres**, v. 67, n. 4, p. 263- 271.
- Aktar, M. W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. **Interdisciplinary toxicology**, 2 (1), 1.
- Alberice, V. Bula do DMA 806 BR CI: informações completas sobre 2,4-D. Agricultura A a Z, 2025. Disponível em: <https://agriculturaaz.com.br/bula-do-dma-806br/#:~:text=A%20bula%20do%20DMA%20806%20BR%20%C3%A9,e%20seletiva%2C%20o%20DMA%20806%20BR%20%C3%A9>. Acesso em: 18 nov 2025.
- Almeida, UT, Siebeneichler, TJ, Crizel, RL, Rombaldi, CV, & Galli, V. (2025). Ácido salicílico e metil jasmonato induzem acúmulo de ácido L-ascórbico (vitamina C), antocianinas e compostos fenólicos apenas em alface roxa. **Journal of Food Composition and Analysis**, 108392.
- Andreassidou, E., Kovačič, A., Manzano-Sánchez, L., Heath, D., Kosjek, T., Pintar, M., & Heath, E. (2025). Absorção de contaminantes emergentes em plantas de tomate: um estudo de campo sobre a reutilização de águas residuais tratadas. **Environment International**, 109916.
- Barbosa, J. C.; Maldonado Junior, W. Agroestat: sistema para análises estatísticas e ensaios agronômicos. **Jaboticabal**: UNESP, 2015.
- Baurle, M.; Griffin, J.; Alford, J.; Curry, A., III; Kenty, M. (2017). Field evaluation of auxin herbicide volatility using cotton and tomato as bioassay crops. **Weed Technol.**, 29, 185-197.
- Bennet, R. J. (1988). The effects of 2, 4-D iso-octyl ester/ioxynil herbicide in the liquid and vapour phases on the growth of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants. **South African Journal of Plant and Soil**, 6 (1), 24-31.
- Bianchin Rebesquini, R., Teixeira Schwab, N., Peligrinotti Tarouco, C., Rubert, J., Buffon, PA, Sielo Holkem, A., & da Rosa Ulguim, A. (2024). Respostas fisiológicas e de crescimento de plantas de alface submetidas à deriva simulada com 2,4-D. **Comunicata Scientiae**, 15, e4083. <https://doi.org/10.14295/cs.v15.4083>
- Boschier, B. N. Glifosato: conheça o herbicida mais utilizado no Brasil e no mundo. Agro Advance, 2024. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-glifosato-herbicida-mais-utilizado/#:~:text=Glifosato:%20conhe%C3%A7a%20o%20herbicida%20mais%20ut>

ilizado%20no%20mundo%20%231. Acesso em: 18 nov 2025.

Brankov, M., Vieira, B. C., Alves, G. S., Zaric, M., Vukoja, B., Houston, T., & Kruger, G. R. (2023). Adjuvant and nozzle effects on weed control using mesotrione and rimsulfuron plus thifensulfuron-methyl. **Crop Protection**, 167, 106209.a

Brankov, M., Simić, M., Ulber, L., Tolimir, M., Chachalis, D., & Dragičević, V. (2023). Effects of nozzle type and adjuvant selection on common lambsquarters (*Chenopodium album*) and johnsongrass (*Sorghum halepense*) control using nicosulfuron in corn. **Weed Technology**, 37(2), 156-164.b

Brankov, M., Simić, M., Samuelson, S. L., Nikolić, D., Čamdžija, Z., Mandić, V., & Dragičević, V. (2024). Nicosulfuron weed control in maize as influenced by adjuvants: original vs. Generic herbicide. **Journal of Crop Health**, 76(5), 1117- 1124.

Brochado, MGS, Mieke, KC, De Paula, DF, Laube, AFS, Alcântara, De La C., Gonzatto, MP e Mendes, KF (2022). Impactos da deriva de dicamba e 2,4-D em mudas de tangerina 'Ponkan', microbiota do solo e *Amaranthus retroflexus* Journal of Hazardous Materials Advances, 6, 100084

Carrer, M. J., de Souza Filho, H. M., Vinholis, M. D. M. B., & Mozambani, C. I. (2022). Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil. **Technological Forecasting and Social Change**, 177, 121510.

Chen, S., Lan, Y., Zhou, Z., Ouyang, F., Wang, G., Huang, X., Deng, X., Cheng, S. (2020). Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV. **Agronomy**, 10, 195.

Chen, X., Jhala, A., Knezevic, S., & Wortman, S. E. (2024). Pumpkin injury and yield response to low rates of 2, 4-D choline and dicamba. **HortScience**, 59(3), 288-293.

Chi, F., Zhao, S., Yang, L., Yang, X., Zhao, X., Zhao, R., & Zhan, J. (2024). Unveiling behaviors of 8: 2 fluorotelomer sulfonic acid (8: 2 FTSA) in *Arabidopsis thaliana*: Bioaccumulation, biotransformation and molecular mechanisms of phytotoxicity. **Science of The Total Environment**, 927, 172165.

Chouhan, S.S., S.S., Patel, R.K., U.P., Tejani, G.G. (2025). Integrando drones na agricultura: abordando tecnologia, desafios, soluções e aplicações para impulsionar o crescimento econômico. **Remote Sensing Applications: Society and Environment** . 38 ,101576.

Culpepper, A. S., Sosnoskie, L. M., Shugart, J., Leifheit, N., Curry, M., & Gray, T. (2018). Effects of low-dose applications of 2, 4-D and dicamba on watermelon. **Weed Technology**, 32(3), 267-272.

- Dayan, F. E., Duke, S. O., and Grossmann, K. (2010). Herbicides as probes in plant biology. *Weed Science*, 58, 340-350. doi: 10.1614/WS-09-092.1
- Della Vechia, J. F. D.; Peres, L. R. S.; Pereira, P. C.; Cruz, C. (2021). Determinação de plantas indicadoras de resíduos de bentazona, atrazina e clomazona no solo. *Ciência e Cultura*. 17, e211707.
- Dong, Y., Dong, S., Guan, J., Liu, X., Yan, X., Li, C., e Miao, H. (2025). Análise de genes candidatos para o comprimento do pedicelo de frutos com base em estudo de associação genômica ampla em pepino (*Cucumissativus* L.). **Disponível em SSRN 5420988**.
- Egan, J. F., Barlow, K. M., & Mortensen, D. A. (2014). A meta-analysis on the effects of 2, 4-D and dicamba drift on soybean and cotton. *Weed Science*, 62(1), 193-206.
- Faostat, F. (2014). Estatísticas da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura [Documento WWW]. **URL**< <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>>. [acesso em 27 de setembro de 2014].
- Ghosh, S., Crist, K., Szarka, A. Z., Grant, S., & Mayer, L. (2023). Volatilization of three herbicides applied to corn. *Atmospheric Environment*, 314, 120128.
- Grossman, K. (2007). Auxin herbicide action. *Plant Signal Behav*, 2, 421-423.
- Grossman, K. (2010). Auxin herbicides: Current status of mechanism and mode of action. *Pest Manage. Science*, 66, 113-120.
- Hafeez, A., Husain, M. A., Singh, S. P., Chauhan, A., Khan, M. T., Kumar, N., ... & Soni, S. K. (2023). Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: A review. *Information processing in Agriculture*, 10(2), 192-203.
- Hand, L. C., Vance, J. C., Randell, T. M., Shugart, J., Gray, T., Luo, X., & Culpepper, A. S. (2021). Effects of low-dose applications of 2,4-D and dicamba on cucumber and cantaloupe. *Weed technology*, 35(3), 357-362.
- Hemphill Jr, D. D., & Montgomery, M. L. (1981). Response of vegetable crops to sublethal application of 2, 4-D. *Weed Science*, 29(6), 632-635.
- Johnson, N., Zhang, G., Soble, A., Johnson, S., & Baucom, R. S. (2023). The consequences of synthetic auxin herbicide on plant-herbivore interactions. *Trends in Plant Science*, 28(7), 765-775.
- Hermes, M.E. Effects of Simulated 2,4-D and Dicamba Drift on Field-Grown Tomato Plants. Master's Thesis, *Texas AT&M University, College Station, TX, USA*, 2020.

www.oaktrust.library.tamu.edu

IBAMA. *Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis*. 2025.

[https://www.gov.br/libama/pt-br/assuntos/quimicos-e-](https://www.gov.br/libama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/registros/registro-de-agrotoxicos-de-uso-nao-agricola)

biologicos/agrotoxicos/registros/registro-de-agrotoxicos-de-uso-nao-agricola.

Acesso <01 de março de 2025>

Ji, X., Peng, B., Ding, H., Cui, B., Nie, H., & Yan, Y. (2023). Purification, structure and biological activity of pumpkin polysaccharides: a review. *Food Reviews International*, 39(1), 307-319

Kermeur, N., Pédrot, M., & Cabello-Hurtado, F. (2025). Nanomagnetitas afetam a biodisponibilidade de cádmio na biota do solo: um sistema alface-caracol-minhoca. *Ecotoxicologia e Segurança Ambiental*, 302, 118658.

Konate, A., He, X., Rui, Y. K., & Zhang, Z. Y. (2017). Magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles alleviate growth inhibition and oxidative stress caused by heavy metals in young seedlings of cucumber (*Cucumis Sativus* L). In *ITM Web of Conferences* (Vol. 12, p. 03034). EDP Sciences.

Khan, N., Ray, R. L., Sargani, G. R., Ihtisham, M., Khayyam, M., & Ismail, S. (2021). Current progress and future prospects of agriculture technology: Gateway to sustainable agriculture. *Sustainability*, 13(9), 4883.

Kieloch, R., & Domaradzki, K. (2013). The influence of selected spraying parameters on two formulation of sulfonylurea herbicides effect. *Journal of Central European Agriculture*, 14(1), 0-0.

Liao, J.; Zang, Y.; Luo, X.W.; Zhou, Z.; Lan, Y.; Zang, Y.; Gu, X.; Xu, W.; Hewitt, A.J. (2019). Optimization of variables for maximizing efficacy and efficiency in aerial spray application to cotton using unmanned aerial systems. *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 12, 10-17.

Liu, W., Luo, J., Guo, D., & Zhang, Q. (2025). Respostas fisiológicas e transcriptômicas da abóbora ao estresse por chumbo e ozônio. *Ecotoxicologia e Segurança Ambiental*, 302, 118567.

Martínez-de la Cruz, E., García-Ramírez, E., Vázquez-Ramos, JM, de la Cruz, HR, & López-Bucio, J. (2015). As auxinas regulam diferencialmente a arquitetura do sistema radicular e os níveis de proteína do ciclo celular em mudas de milho. *Jornal de fisiologia vegetal*, 176, 147-156.

Martin, D. E., Woldt, W. E., & Latheef, M. A. (2019). Effect of application height and ground speed on spray pattern and droplet spectra from remotely piloted aerial

application systems. *Drones*, 3 (4), 83.

Meesaragandla, S., Jagtap, M. P., Khatri, N., Madan, H., & Vadduri, A. A. (2024). Herbicide spraying and weed identification using drone technology in modern farms: A comprehensive review. *Results in Engineering*, 21, 101870.

Mendelová, A., Fikselová, M., & Mendel, L. (2013). Carotenoids and lycopene content in fresh and dried tomato fruits and tomato juice. *Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendelianae brunensis*, 61(5), 1329-1337.

Moore, D. R., Priest, C. D., Brayden, B. H., Hanzas Jr, J. P., Arpino, M. R., Richardson, L., & Yang, Y. (2021). A field spray drift study to determine the downwind effects of isoxaflutole herbicide to nontarget plants. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 18(3), 757-769.

Nebiker, S., Annen, A., Scherrer, M., & Oesch, D. (2008). A light-weight multispectral sensor for micro UAV—Opportunities for very high resolution airborne remote sensing. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Science*, 37(B1), 1193-1200.

Nunes, A. L., & Vidal, R. A. (2009). Seleção de plantas quantificadoras de herbicidas residuais. *Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, 19(1), 19-28.

Pachuta, A., Berner, B., Chojnacki, J., Moitzi, G., Dvořák, J., Keutgen, A., ... & Mikeska, M. (2023). Propellers spin rate effect of a spraying drone on quality of liquid deposition in a crown of young spruce. *Agriculture*, 13(8), 1584.

Pádua, A.C. C., Pereira, J.A., Araújo, F.R., Silva, A.B., Casagrande, H., Diamantino, E.M., Garlich, N., Cruz, C. Eficácia da mistura do herbicida 2,4-D+aminopiralde com adição de adjuvantes no controle de plantas daninhas e sensibilidade do capim braquiária (*Urochloa decumbens*). *Ciência e Cultura*, 19, e231901, 2023.

Parmar, T. K., Rawtani, D., & Agrawal, Y. K. (2016). Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution. *Frontiers in life science*, 9(2), 110-118.

Pereira, PC, Brunetti, IA, da Silva, AB, de Oliveira, AC, da Cruz, C., Duke, SO, & Carvalho, LBD (2025). Impactos do Dicamba em Bioindicadores Aquáticos e Plantas Não-Alvo. *AgriEngineering*, 7 (10), 336.

Peres, L., Della Vechia, J. F., & Cruz, C. (2017). Efeito Hormese de Subdoses de Herbicidas em Macrófitas Submersas em Condição de Microensaio. *Planta Daninha*, 35, e017165857.

Perez, L. M., Mauleon, R., Arick, M. A., Magbanua, Z. V., Peterson, D. G., and Dean, J. F.D. (2022). Transcriptome analysis of the 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) tolerant cotton chromosome substitution line CS-B15sh and its susceptible parental

lines *G. hirsutum* L. cv. Texas Marker-1 and *G. barbadense* L. cv. Pima

379. **Front. Plant Science.**, 13, 910369.

Pinela, J., Petropoulos, S. A., & Barros, L. (2022). Advances in tomato and tomato compounds research and technology. **Frontiers in Nutrition**, 9, 1018498.

Puppala, H., Peddinti, P. R., Tamvada, J. P., Ahuja, J., & Kim, B. (2023). Barriers to the adoption of new technologies in rural areas: The case of unmanned aerial vehicles for precision agriculture in India. **Technology in Society**, 74, 102335.

Ramos, S. E., Rzedkiewicz, L. D., Turcotte, M. M., & Ashman, T. L. (2021). Damage and recovery from drift of synthetic-auxin herbicide dicamba depends on concentration and varies among floral, vegetative, and lifetime traits in rapid cycling *Brassica rapa*. **Science of the Total Environment**, 801, 149732.

Relatórios de comercialização de agrotóxicos. Gov.br, 2024. Disponível em:

[https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-](https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos#:~:text=Os%2010%20ingredientes%20ativos%20mais,Malationa%20e%20Dibrometo%20de%20Diquate)

[biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-](https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos#:~:text=Os%2010%20ingredientes%20ativos%20mais,Malationa%20e%20Dibrometo%20de%20Diquate)

[agrotoxicos#:~:text=Os%2010%20ingredientes%20ativos%20mais,Malationa%20e%20Dibrometo%20de%20Diquate](https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos#:~:text=Os%2010%20ingredientes%20ativos%20mais,Malationa%20e%20Dibrometo%20de%20Diquate). Acesso em: 18 nov 2014.

Sánchez-Fernández, L., Barrera, M., Martínez-Guanter, J., & Pérez-Ruiz, M. (2023). Drift reduction in orchards through the use of an autonomous UAV system. **Computers and Electronics in Agriculture**, 211, 107981.

Spadotto, C. A., & Gomes, M. A. F. (2021). Perdas de nutrientes. Ageitec. *Agência Embrapa de Informação Tecnológica, Brasília*.

Silva, T. R.; Brunetti, I. A.; Perez, L. H. O.; Pereira, P. C.; Santos, K. P.; CRUZ, C. (2020) Efeito de subdoses de sulfentrazone em plantas aquáticas e ecotoxicologia para bioindicadores. **Ciência e Cultura.**, 16, e201606.

Sterling, T. M. & Hall, J. C. (1997). Mechanism of action of natural auxins and the auxinic herbicides. In: *Herbicide activity: Toxicology, biochemistry, and molecular biology*. Eds. R. M. Roe, J. D. Burton and R. J. Kuhr (Amsterdam: IOS Press), 111-141.

Song, Y. (2014). Insight into the mode of action of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) as an herbicide. *J. Integrative Plant Biology*, 56(2), 106-113.

Tudo sobre herbicidas: história, tipos, aplicações e desafios. Mais agro, 2025.

Disponível em: [https://maisagro.syngenta.com.br/tudo-sobre-agro/tudo-sobre-](https://maisagro.syngenta.com.br/tudo-sobre-agro/tudo-sobre-herbicidas-historia-tipos-aplicacoes-e-desafios/#:~:text=Hist%C3%B3ria%20dos%20herbicidas%20no%20Brasil,come%C)

[herbicidas-historia-tipos-aplicacoes-e](https://maisagro.syngenta.com.br/tudo-sobre-agro/tudo-sobre-herbicidas-historia-tipos-aplicacoes-e-desafios/#:~:text=Hist%C3%B3ria%20dos%20herbicidas%20no%20Brasil,come%C)

[desafios/#:~:text=Hist%C3%B3ria%20dos%20herbicidas%20no%20Brasil,come%C](https://maisagro.syngenta.com.br/tudo-sobre-agro/tudo-sobre-herbicidas-historia-tipos-aplicacoes-e-desafios/#:~:text=Hist%C3%B3ria%20dos%20herbicidas%20no%20Brasil,come%C)

3%A7aram%20a%20ser%20amplamente%20adotadas. Acesso em:18 nov 2025.

Yang, F., Xue, X., Cai, C., Sun, Z., & Zhou, Q. (2018). Numerical simulation and analysis on spray drift movement of multirotor plant protection unmanned aerial vehicle. **Energies**, 11(9), 2399.

Van Rensburg, E., & Breeze, V. G. (1990). Uptake and development of phytotoxicity following exposure to vapour of the herbicide 14C 2, 4-D butyl by tomato and lettuce plants. *Environmental and experimental botany*, 30(4), 405-414.

Veronezi, C. M., & Jorge, N. (2012). Aproveitamento de sementes de abóbora (*Cucurbita* sp) como fonte alimentar. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**,14(1), 113-124.

Wang, S.L.; Song, J.L.; He, X.K.; Song, L.; Wang, X.N.; Wang, C.L.; Wang, Z.H.; Ling, Y. Performances evaluation of four typical unmanned aerial vehicles used for pesticide application in China. **Int. J. Agric. Biol. Eng.** 2017, 10, 22-31.

Wang, Z., Lan, L., He, X., & Herbst, A. (2020). Dynamic evaporation of droplet with adjuvants under different environment conditions. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13 (2), 1-6.

Wang, J., Lan, Y., Wen, S., Hewitt, A. J., Yao, W., & Chen, P. (2020). Meteorological and flight altitude effects on deposition, penetration, and drift in pineapple aerial spraying. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 15(1), e2382.

Warmund, M. R., Ellersieck, M. R., & Smeda, R. J. (2022). Sensitivity and recovery of tomato cultivars following simulated drift of dicamba or 2, 4-D. **Agriculture**,12(9), 1489.

Wen, S.; Han, J.; Ning, Z.; Lan, Y.; Yin, X.; Zhang, J.; Ge, Y. Numerical analysis and validation of spray distributions disturbed by quad-rotor drone wake at different flight speeds. **Comput. Electron. Agric.** 2019, 166, 105036.

Zaccaro-Gruener, M. L., Norsworthy, J. K., Brabham, C. B., Barber, L. T., Butts, T. R., Roberts, T. L., & Mauromoustakos, A. (2022). Evaluation of dicamba volatilization when mixed with glyphosate using imazethapyr as a tracer. *J. Environmental Management*, 317, 115303.

Zoz, A., Hirata, A. C. S., Scaloppi, E. J., Borges, W. L. B., Araújo, T. A. D. N. D., & Freitas, R. S. D. (2025). 2, 4-D and glyphosate drift interfere with the growth and initial development of rubber trees. **Bragantia**,84, e20240151.