

**RESISTÊNCIA MÚLTIPLA DE *AMARANTHUS SPP.* A INIBIDORES DE
EPSPS E ALS EM POPULAÇÕES COLETADAS EM REGIÕES DO
ESTADO DE GOIÁS**

Samuel Afonso Sampaio Silva
Eng. Agrônomo

URUTÁI –
GOIÁS 2026

SAMUEL AFONSO SAMPAIO SILVA

**RESISTÊNCIA MÚLTIPLA DE *AMARANTHUS SPP.* A INIBIDORES DE
EPSPS E ALS EM POPULAÇÕES COLETADAS EM REGIÕES DO
ESTADO DE GOIÁS**

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Ribeiro da Cunha
Coorientador: Prof. Dr. Lucas da Silva Araújo

Dissertação apresentada ao Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Proteção de Plantas para obtenção do título de MESTRE.

Urutaí – GO
2026

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

<input type="checkbox"/> Tese (doutorado)	<input type="checkbox"/> Artigo científico
<input checked="" type="checkbox"/> Dissertação (mestrado)	<input type="checkbox"/> Capítulo de livro
<input type="checkbox"/> Monografia (especialização)	<input type="checkbox"/> Livro
<input type="checkbox"/> TCC (graduação)	<input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento
<input type="checkbox"/> Produto técnico e educacional - Tipo: <input type="text"/>	
Nome completo do autor: <input type="text" value="Samuel Afonso Sampaio Silva"/>	Matrícula: <input type="text" value="2024101330540012"/>
Título do trabalho: <input type="text" value="Resistência múltipla de Amaranthus spp. a inibidores de EPSPS e ALS em populações coletadas em regiões do estado de Goiás"/>	

RESTRICÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
SAMUEL AFONSO SAMPAIO SILVA
Data: 21/05/2026 11:27:19 -0300
Verifique em <https://validar.if.gov.br>

/ /
Local Data

Documento assinado digitalmente
PAULO CESAR RIBEIRO DA CUNHA
Data: 21/05/2026 11:51:22 -0300
Verifique em <https://validar.if.gov.br>

dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

S586s Silva, Samuel Afonso Sampaio
RESISTÊNCIA MÚLTIPLA DE AMARANTHUS SPP. A
INIBIDORES DE EPSPS E ALS EM POPULAÇÕES
COLETADAS EM REGIÕES DO ESTADO DE GOIÁS /
Samuel Afonso Sampaio Silva. Urutai 2026.

39f. il.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Ribeiro da Cunha.

Coorientador: Prof. Dr. Lucas da Silva Araújo.

Dissertação (Mestre) - Instituto Federal Goiano, curso de
0133054 - Mestrado Profissional em Proteção de Plantas - Urutai
(Campus Urutai).

1. Resistência a herbicidas. 2. EPSPS. 3. ALS. 4. Curva
dose-resposta. 5. Plantas-daninhas. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 41/2026 - REPG-URT/DPGPI-UR/CMPURT/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO

BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos vinte sete dias de abril do ano de dois mil e vinte e seis, às quatorze e trinta horas, reuniram-se por videoconferência os componentes da banca examinadora, para procederem à avaliação da defesa de dissertação em nível de mestrado, de autoria de **Samuel Afonso Sampaio Silva**, discente do **Programa de Pós-Graduação em Proteção de Plantas do Instituto Federal Goiano - Campus Urutaí**, com trabalho intitulado "**Resistência múltipla de *Amaranthus spp.* a inibidores de EPSPS e ALS em populações de regiões selecionadas de Goiás**". A sessão foi aberta pelo presidente da banca examinadora, **Prof. Dr. Paulo César Ribeiro da Cunha**, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A palavra, a seguir, foi concedida ao autor da dissertação para, em 30 minutos, proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu ao examinado, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se à avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Proteção de Plantas, a dissertação foi **APROVADA**, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM PROTEÇÃO DE PLANTAS**, na área de concentração em **Fitossanidade**, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí. A conclusão do curso dar-se-á mediante ao depósito da dissertação definitiva no Repositório Institucional do IF Goiano, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60 (sessenta) dias** da sua ocorrência. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e para constar, foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada eletronicamente pelos membros da banca examinadora.

Membros da Banca Examinadora:

Nome	Instituição	Situação no Programa
Prof. Dr. Paulo César Ribeiro da Cunha	IF Goiano	Presidente
Prof. Dr. Anderson Rodrigo da Silva	IF Goiano	Membro interno
Prof. Dr. Cássio Jardim Tavares	IF Goiano – Campus Cristalina	Membro externo

Documento assinado eletronicamente por:

- **Paulo Cesar Ribeiro da Cunha, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 12/05/2026 11:20:32.
- **Cassio Jardim Tavares, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 12/05/2026 11:36:30.
- **Anderson Rodrigo da Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 18/05/2026 16:07:14.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 23/04/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 812731

Código de Autenticação: 569e86a768



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Urutai

Rodovia Geraldo Silva Nascimento, Km 2.5, SN, Zona Rural, URUTÁI / GO, CEP 75790-000

(64) 3465-1900

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Espécies de <i>Amaranthus</i> com resistência a herbicidas até o momento no Brasil.....	13
Tabela 2. Parâmetros do modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4), coeficiente de determinação (R^2) e doses efetivas (ED_{50} e ED_{80}) para controle (%) de populações de <i>Amaranthus spp.</i> submetidas ao glifosato.....	22
Tabela 3. Parâmetros do modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4), coeficiente de determinação (R^2) e doses de redução de crescimento (GR_{50} e GR_{80}) para massa seca relativa (%) de populações de <i>Amaranthus spp.</i> submetidas ao glifosato.....	24
Tabela 4. Valores mínimos e máximos de massa seca relativa (%) de populações de <i>Amaranthus spp.</i> submetidas ao glifosato, para aquelas cujo modelo log-logístico não apresentou ajuste.....	24
Tabela 5. Parâmetros do modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4), coeficiente de determinação (R^2) e doses efetivas (ED_{50} e ED_{80}) para controle (%) de populações de <i>Amaranthus spp.</i> submetidas ao clorimurrom.....	28
Tabela 6. Parâmetros do modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4), coeficiente de determinação (R^2) e doses de redução de crescimento (GR_{50} e GR_{80}) para massa seca relativa (%) de populações de <i>Amaranthus spp.</i> submetidas ao clorimurrom.....	30
Tabela 7. Valores mínimos e máximos de massa seca relativa (%) de populações de <i>Amaranthus spp.</i> submetidas ao clorimurrom, para aquelas cujo modelo log-logístico não apresentou ajuste.....	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curvas dose–resposta de populações de <i>Amaranthus</i> spp. ao glifosato, com base no controle (%) avaliado aos 28 dias após aplicação.	21
Figura 2. Curvas dose–resposta de populações de <i>Amaranthus</i> spp. ao glifosato, com base na massa seca relativa (%).	23
Figura 3. Curvas dose–resposta para controle (%) de populações de <i>Amaranthus</i> spp. submetidas a diferentes doses de clorimurrom.	27
Figura 4. Curvas dose–resposta para massa seca relativa (%) de populações de <i>Amaranthus</i> spp. submetidas a diferentes doses de clorimurrom.	29

SUMÁRIO

Sumário

ÍNDICE DE TABELAS	7
LISTA DE FIGURAS	8
SUMÁRIO	9
RESUMO	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	15
3. JUSTIFICATIVAS.....	15
4. MATERIAIS E MÉTODOS	16
4.1 Local e condições experimentais.....	16
4.2 Preparo de vasos e solo	16
4.3 Semeadura	16
4.4 Manejo de irrigação.....	17
4.5 Condução experimental.....	17
4.6 Delineamento experimental.....	18
4.7 Análise estatística.....	18
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
5.1 Glifosato	21
5.2 Clorimurom	27
5.3 Implicações dos resultados para o manejo de <i>Amaranthus spp.</i>	32
6. CONCLUSÕES.....	34
7. REFERÊNCIAS	35
9. ANEXOS.....	38
.....	38

RESUMO

O aumento da ocorrência de populações de plantas daninhas resistentes a herbicidas tem se tornado um dos principais desafios para a produção agrícola. Nesse contexto, espécies do gênero *Amaranthus* destacam-se pela elevada capacidade adaptativa e pela ocorrência de biótipos com resistência a diferentes mecanismos de ação. O presente estudo teve como objetivo avaliar a sensibilidade de populações de *Amaranthus spp.* aos herbicidas glifosato (inibidor da EPSPS) e clorimuro (inibidor da ALS), por meio da metodologia de curvas dose–resposta. Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, utilizando nove populações coletadas em áreas agrícolas nos municípios de Cristalina e Orizona, no estado de Goiás. Foram avaliadas doses crescentes dos herbicidas, sendo o controle visual (%) determinado aos 28 dias após a aplicação e a massa seca relativa (%) utilizada como variável complementar. Os dados foram ajustados ao modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4), sendo estimadas as doses necessárias para promover 50% (ED₅₀) e 80% (ED₈₀) de controle visual. Para a variável massa seca, a interpretação dos parâmetros de redução de crescimento foi realizada apenas para as populações com ajuste ao modelo, enquanto para as demais adotou-se abordagem descritiva baseada nos valores mínimos e máximos observados. Os resultados evidenciaram diferenças expressivas na sensibilidade das populações aos herbicidas avaliados. Para o glifosato, a maioria das populações apresentou resistência, com destaque para POP2, POP3, POP4 e POP5, enquanto POP7 e POP9 foram caracterizadas como suscetíveis. Para o clorimuro, observou-se ocorrência ainda mais acentuada de resistência, com destaque para POP8, POP1 e POP5, enquanto POP7 apresentou maior suscetibilidade. A análise integrada dos parâmetros ED₅₀, ED₈₀ e dos fatores de resistência (FR) permitiu confirmar a ocorrência de populações com resistência aos herbicidas avaliados. Esses resultados indicam a presença de biótipos com resistência múltipla aos mecanismos de ação EPSPS e ALS em populações de *Amaranthus spp.* no estado de Goiás, evidenciando a necessidade da adoção de estratégias de manejo integrado para mitigar a evolução da resistência.

Palavras-chave: resistência a herbicidas; EPSPS; ALS; populações de plantas daninhas; modelagem dose–resposta.

ABSTRACT

The increasing occurrence of herbicide-resistant weed populations has become one of the main challenges for agricultural production. In this context, species of the genus *Amaranthus* stand out due to their high adaptive capacity and the occurrence of biotypes resistant to different mechanisms of action. This study aimed to evaluate the sensitivity of *Amaranthus spp.* populations to glyphosate (EPSPS inhibitor) and chlorimuron (ALS inhibitor) using dose–response curve methodology. The experiments were conducted under greenhouse conditions, using nine populations collected from agricultural areas in the municipalities of Cristalina and Orizona, Goiás State, Brazil. Increasing herbicide doses were applied, and visual control (%) was assessed at 28 days after application, while relative dry mass (%) was used as a complementary variable. Data were fitted to a four-parameter log-logistic model (LL.4), and the doses required to achieve 50% (ED₅₀) and 80% (ED₈₀) control were estimated. For the dry mass variable, growth reduction parameters were interpreted only for populations with satisfactory model fit, while for the others, a descriptive approach based on minimum and maximum observed values was adopted. The results revealed significant differences in sensitivity among the populations. For glyphosate, most populations showed resistance, particularly POP2, POP3, POP4, and POP5, whereas POP7 and POP9 were characterized as susceptible. For chlorimuron, resistance was even more pronounced, especially in POP8, POP1, and POP5, while POP7 showed higher susceptibility. The integrated analysis of ED₅₀, ED₈₀, and resistance factors (RF) confirmed the occurrence of resistant populations. These findings indicate the presence of multiple resistance to EPSPS and ALS inhibitors in *Amaranthus spp.* populations in Goiás State, Brazil, highlighting the need for integrated weed management strategies to mitigate resistance evolution.

Keywords: herbicide resistance; EPSPS; ALS; weed populations; dose–response modeling..

1. INTRODUÇÃO

As plantas daninhas representam um dos principais fatores limitantes à produtividade das culturas agrícolas, devido à competição por recursos essenciais, como luz, água e nutrientes, além de atuarem como hospedeiras de pragas e doenças. Na ausência de controle adequado, as perdas podem atingir até 90% (FRANCISCHINI et al., 2013). Esses impactos estão diretamente relacionados à elevada capacidade adaptativa e competitiva dessas espécies, favorecendo sua sobrevivência e estabelecimento nos sistemas agrícolas (NETO, 2017).

Dentre as principais plantas daninhas associadas aos sistemas agrícolas, destaca-se o gênero *Amaranthus*, composto por espécies de ciclo anual, reprodução exclusivamente por sementes e, em geral, de difícil distinção morfológica entre si (LORENZI, 2008; KISSMANN; GROTH, 1999). O gênero apresenta ampla distribuição nas regiões produtoras, com aproximadamente 70 espécies descritas mundialmente (HOLM et al., 1997), muitas das quais apresentam elevado potencial competitivo. Espécies como *Amaranthus palmeri* e *Amaranthus hybridus* são frequentemente associadas a culturas como soja, milho e algodão, em função de sua elevada agressividade e dificuldade de controle.

O controle químico constitui a principal estratégia de manejo dessas plantas daninhas, destacando-se os herbicidas inibidores da enzima 5-enolpiruvilshiquimato-3-fosfato sintase (EPSPS), como o glifosato, e os inibidores da acetolactato sintase (ALS), como o clorimrom. O glifosato, classificado pelo HRAC como Grupo 9, atua na inibição da EPSPS e tornou-se o herbicida mais utilizado mundialmente, especialmente após a adoção de culturas geneticamente modificadas tolerantes (SZÉKÁCS; DARVAS, 2011; VEREECKEN, 2005). Já os inibidores da ALS (Grupo 2) constituem um dos principais grupos de herbicidas disponíveis, amplamente utilizados no manejo de plantas daninhas em culturas anuais.

Entretanto, o uso intensivo e repetitivo desses mecanismos de ação favoreceu a seleção de biótipos resistentes. Atualmente, os inibidores da ALS representam o grupo com maior número de espécies resistentes registradas, enquanto os casos de resistência ao glifosato também apresentam crescimento expressivo em nível mundial (HEAP, 2023).

A resistência a herbicidas pode ocorrer por diferentes mecanismos, sendo classificada em resistência relacionada ao sítio de ação (target-site resistance – TSR) e não relacionada ao sítio de

ação (non-target-site resistance – NTSR) (TRANEL; WRIGHT, 2002; DÉLYE, 2005). A TSR envolve alterações na enzima alvo, como mutações ou amplificação gênica, enquanto a NTSR está associada a processos como redução na absorção, translocação e metabolismo do herbicida (POWLES; YU, 2010; BECKIE; TARDIF, 2012). A amplificação gênica, por exemplo, resulta no aumento da produção da enzima alvo, reduzindo a eficiência do herbicida mesmo em doses elevadas (GAINES et al., 2010).

No Brasil, o primeiro registro de resistência de *Amaranthus palmeri* ao glifosato ocorreu em 2015, no estado de Mato Grosso, evidenciando a introdução e rápida disseminação dessa espécie no país (REVISTA CULTIVAR, 2015; ANDRADE JÚNIOR et al., 2015). Estudos conduzidos em condições brasileiras demonstraram a ocorrência de biótipos resistentes, sendo necessárias doses superiores a 4.500 g e.a. ha⁻¹ de glifosato para atingir níveis elevados de controle, o que inviabiliza o manejo químico sob o ponto de vista agrônômico e econômico (CARVALHO et al., 2015).

Além disso, espécies do gênero *Amaranthus* têm apresentado aumento no número de casos de resistência envolvendo diferentes mecanismos de ação de herbicidas. A síntese dessas ocorrências no Brasil está apresentada na Tabela 1, evidenciando a evolução e complexidade do problema ao longo dos anos.

Tabela 1. Espécies de *Amaranthus* com resistência a herbicidas até o momento no Brasil.

Ano	Espécie	Mecanismo de Ação	Ativo	Cultura
2011	<i>Amaranthus retroflexus</i>	Inibição de Acetolactato Sintase, inibidores de PSII	atrazine, prometryne, trifloxysulfuron-Na	Algodão
2012	<i>Amaranthus retroflexus</i>	Inibição de Acetolactato Sintase	pyrithiobac-sodium, trifloxysulfuron-Na	Algodão
2014	<i>Amaranthus retroflexus</i>	Inibição de Protoporfirinogênio Oxidase	fomesafen	Algodão, Soja
2015	<i>Amaranthus palmeri</i>	Inibição de Enolpiruvil Chiquimato Fosfato Sintase	Glyphosate	Algodão
2016	<i>Amaranthus palmeri</i>	Inibição de Acetolactato Sintase, Inibição de Enolpiruvil Chiquimato Fosfato Sintase	imazethapyr, chlorimuron-ethyl, cloransulam-methyl, glyphosate	Milho, Algodão, Soja
2018	<i>Amaranthus hybridus</i>	Inibição de Acetolactato Sintase, Inibição de Enolpiruvil Chiquimato Fosfato Sintase	chlorimuron-ethyl, glyphosate	Soja

Fonte: Heap (2023)

Para *Amaranthus hybridus*, há registros de resistência em diversos países, envolvendo múltiplos mecanismos de ação, incluindo inibidores da ALS, EPSPS, PROTOX e fotossistema II, demonstrando a elevada plasticidade adaptativa dessa espécie (HEAP et al., 2020). Na América do Sul, estudos conduzidos em países como Argentina, Bolívia e Brasil têm documentado a ocorrência de biótipos resistentes em espécies do gênero *Amaranthus*, evidenciando sua ampla distribuição geográfica e a crescente complexidade do manejo (HEAP, 2023; OLIVEIRA et al., 2024).

Diante desse cenário, a ocorrência de falhas de controle e a suspeita de resistência em populações de *Amaranthus* spp. reforçam a necessidade de métodos que permitam avaliar de forma quantitativa a resposta dessas plantas aos herbicidas. Nesse contexto, abordagens que descrevam o comportamento das populações em função de diferentes doses tornam-se essenciais para a correta interpretação da sensibilidade e identificação de possíveis casos de resistência.

A utilização de curvas dose–resposta constitui uma das principais ferramentas para essa finalidade, pois permite descrever a relação entre a dose aplicada e a resposta biológica observada, possibilitando a estimativa de parâmetros como ED_{50} e ED_{80} , amplamente empregados na comparação entre populações suscetíveis e resistentes.

Entre os modelos disponíveis, o log-logístico de quatro parâmetros destaca-se por sua ampla utilização e adequada descrição da resposta biológica em função da dose, sendo considerado padrão em estudos dessa natureza (SEEFELDT et al., 1995). Dessa forma, a análise por meio de curvas dose–resposta representa uma ferramenta fundamental para a identificação e caracterização da resistência, contribuindo para a tomada de decisão no manejo dessas espécies.

2. OBJETIVOS

Confirmar a resistência de caruru (*Amaranthus spp.*) aos herbicidas glifosato (inibidor de EPSPS) e clorimurrom (inibidor de ALS) em populações coletadas no estado de Goiás, por meio da metodologia da curva dose-resposta.

3. JUSTIFICATIVAS

O uso intensivo de herbicidas é fundamental para o manejo de plantas daninhas nos sistemas agrícolas modernos. Entretanto, a aplicação repetitiva de moléculas com o mesmo mecanismo de ação tem favorecido a seleção de biótipos resistentes, comprometendo a eficiência do controle químico e elevando os custos de produção (FARHANGI-ABRIZ, 2016; NEVE et al., 2014).

Nos últimos anos, o problema tem se intensificado com o surgimento de populações com resistência múltipla, capazes de sobreviver a diferentes mecanismos de ação, reduzindo significativamente as alternativas de controle disponíveis (HEAP, 2023). Nesse contexto, espécies do gênero *Amaranthus* destacam-se pela elevada capacidade de adaptação e pela ocorrência de biótipos resistentes a herbicidas amplamente utilizados, como inibidores da ALS e da EPSPS, além de outros mecanismos já relatados (BAYÓN, 2022; HEAP, 2021).

No Brasil, primeiros registros de resistência em espécies do gênero *Amaranthus* concentraram-se na região Sul, com posterior expansão para outras regiões produtoras (HEAP, 2023; VARGAS et al., 2013). No estado de Goiás, tem-se observado aumento na ocorrência de populações de caruru (*Amaranthus spp.*) com falhas de controle em campo, especialmente em áreas manejadas com herbicidas como o glifosato e inibidores da ALS. Essas falhas, frequentemente observadas em reboleiras, indicam a possível presença de biótipos resistentes e evidenciam o risco de disseminação dessas populações entre áreas agrícolas (POWLES; YU, 2010; BECKIE; TARDIF, 2012).

Diante desse cenário, é fundamental avaliar a sensibilidade das populações locais de *Amaranthus* aos principais mecanismos de ação utilizados. A geração dessas informações é essencial para decidir estratégias de manejo mais eficientes, reduzir prejuízos e contribuir para a

sustentabilidade dos sistemas produtivos. Assim, este estudo justifica-se pela necessidade de diagnosticar e caracterizar possíveis casos de resistência em populações de caruru no estado de Goiás.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Local e condições experimentais

O experimento foi conduzido em casa de vegetação (Anexo 1) no Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí, localizado na Rodovia Geraldo Silva Nascimento, Km 2,5, Zona Rural, Urutaí – GO, no período de agosto de 2025 a janeiro de 2026. A casa de vegetação manteve condições ambientais controladas ao longo do período experimental (Latitude: -17.485267 e longitude - 48.211288).

4.2 Preparo de vasos e solo

Foram utilizados 720 vasos com capacidade de 650 mL e aproximadamente 6 cm de altura, preenchidos com solo coletado em área nunca cultivada (Latitude: -17.4884 e longitude: - 48.21864), sem histórico de cultivo agrícola ou aplicação de herbicidas. O solo foi previamente peneirado para homogeneização e remoção de impurezas. A adubação foi realizada com fertilizante formulado 05-25-15, sendo 20 gramas para cada 10 litros de terra, incorporado ao solo dos vasos, visando suprir as exigências nutricionais das plantas.

4.3 Semeadura

Após o enchimento dos vasos, realizou-se a semeadura de sementes de caruru (*Amaranthus spp.*), as quais foram coletadas em campo nos municípios de Cristalina-GO e Orizona - GO, com menos de um ano de armazenamento, e mantidas sob condições adequadas até sua utilização no experimento. Em seguida, aplicou-se uma camada de substrato comercial sobre as sementes (Anexo 2), visando auxiliar a emergência das plântulas.

4.4 Manejo de irrigação

A irrigação foi realizada manualmente com regador, mantendo-se volume de água uniforme entre as unidades experimentais. As irrigações foram realizadas três vezes ao dia, desde a instalação até o encerramento do experimento, a fim de assegurar adequada disponibilidade hídrica e uniformidade da umidade do substrato.

4.5 Condução experimental

As doses de glifosato utilizadas foram: 0; 135; 270; 540; 1.080; 2.160; 4.320; 8.640; 17.280 e 34.560 g e.a. ha⁻¹, sendo 1.080 g e.a. ha⁻¹ a dose recomendada comercialmente. Para o clorimurrom-etílico, as doses avaliadas foram: 0; 10; 20; 40; 80; 160; 320; 640; 1.280 e 2.560 g i.a ha⁻¹, sendo 80 g i.a ha⁻¹ a dose recomendada em bula.

Após a emergência das plântulas, realizou-se o desbaste, mantendo-se três plantas por vaso (Anexo 5), prática usual em experimentos de dose-resposta conduzidos em casa de vegetação (Raimondi et al., 2015).

As aplicações foram realizadas quando as plantas atingiram o estágio de quatro a seis folhas (Anexo 6) completamente expandidas, utilizando-se pulverizador costal pressurizado com CO₂, garantindo pressão constante e uniformidade na deposição da calda. As aplicações ocorreram no período da manhã (8:00–10:00 h), sob condições ambientais favoráveis, com umidade relativa do ar superior a 70%, temperatura inferior a 28 °C e ausência de ventos.

As avaliações de controle foram realizadas aos 28 dias após a aplicação (DAA), utilizando escala visual percentual de 0 a 100%, em que 0% representa ausência de controle e 100% controle total das plantas (SBCPD, 1995). Simultaneamente, foi avaliada a sobrevivência das plantas, atribuindo-se nota 1 para plantas vivas e 0 para plantas mortas.

Após as avaliações, as plantas foram cortadas rente ao solo, ensacadas em sacos de papel e acondicionadas em estufa de circulação forçada de ar a 60 °C por 48 horas, até obtenção de massa constante (Anexo 7). Posteriormente, determinou-se a massa seca da parte aérea por meio de pesagem em balança de precisão.

A massa seca obtida foi convertida em valores percentuais em relação à testemunha (dose zero), considerada como 100%, a fim de padronizar os dados e permitir a comparação entre tratamentos. Para isso, os valores individuais de cada repetição foram expressos em relação à média da testemunha, conforme a seguinte equação:

$$\% \text{ matéria seca relativa à testemunha} = \frac{\text{Valor da repetição} * 100}{\text{Médias da testemunha}}$$

4.6 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com o objetivo de avaliar a resposta de diferentes populações de caruru (*Amaranthus spp.*) a doses crescentes de herbicidas.

Foram conduzidos dois experimentos independentes, um para cada herbicida avaliado (glifosato e clorimurrom). Em ambos, foram testadas nove populações de caruru, mantendo-se o mesmo conjunto de populações nas duas avaliações, a fim de garantir padronização experimental e comparabilidade dos resultados.

Para cada herbicida, foram avaliadas dez doses (incluindo a testemunha sem aplicação), distribuídas em progressão logarítmica, com quatro repetições por dose. Cada vaso constituiu uma unidade experimental, totalizando quarenta unidades experimentais por população em cada experimento.

As populações foram analisadas de forma independente, com ajuste de curvas dose-resposta para cada uma delas.

4.7 Análise estatística

Os dados de controle (%) e massa seca relativa (%) foram submetidos à análise de regressão não linear, utilizando modelos de curvas dose-resposta. As análises foram realizadas separadamente para cada herbicida, considerando as diferentes populações avaliadas.

Foi ajustado o modelo log-logístico de quatro parâmetros, conforme proposto por Seefeldt

et al. (1995), utilizando o pacote drc no software R.

A qualidade do ajuste dos modelos foi avaliada com base no coeficiente de determinação (R^2), na significância dos parâmetros estimados e na coerência biológica das curvas ajustadas.

O modelo log-logístico de quatro parâmetros é descrito pela seguinte equação:

$$y = Pmin + \frac{a - Pmin}{1 + \left(\frac{x}{ED50}\right)^b}$$

onde:

- **y** representa a resposta observada como controle (%) ou massa seca relativa (%);
- **x** corresponde à dose do herbicida;
- **Pmin** representa o limite inferior da curva;
- **a** corresponde ao limite superior da curva;
- **b** é o coeficiente de inclinação da curva em torno da ED_{50} ;
- **ED₅₀** corresponde à dose necessária para proporcionar 50% da resposta máxima estimada pelo modelo.

A qualidade do ajuste dos modelos foi avaliada por meio da significância dos parâmetros estimados e da adequação do modelo aos dados observados.

Foram estimadas as doses efetivas necessárias para promover 50% e 80% de controle (ED_{50} e ED_{80}), utilizadas como indicadores do nível de suscetibilidade das populações ao herbicida.

O fator de resistência ($FR = R/S$) expressa o número de vezes em que a dose necessária para promover 50% de controle em uma população menos sensível é superior à dose necessária para promover o mesmo nível de controle na população considerada suscetível (Hall et al., 1998).

No presente estudo, os fatores de resistência foram estimados com base nos valores de ED_{50} (controle visual), calculados pela razão entre a dose efetiva da população avaliada e a da população considerada mais suscetível, utilizada como referência.

A interpretação da resistência foi realizada de forma integrada, considerando simultaneamente critérios biológicos e agrônômicos. O critério biológico foi representado pelo

fator de resistência (FR), enquanto o critério agrônomo foi estabelecido com base na comparação entre os valores de ED_{80} e a dose recomendada do herbicida.

Dessa forma, populações que apresentaram valores elevados de FR associados a valores de ED_{80} superiores à dose recomendada foram interpretadas como resistentes ao herbicida avaliado. Por outro lado, populações com baixos valores de FR e ED_{80} inferiores à dose recomendada foram consideradas suscetíveis, enquanto situações intermediárias foram interpretadas como indicativas de baixa sensibilidade.

Para a variável massa seca relativa, os parâmetros de redução de crescimento (GR_{50} e GR_{80}) foram estimados apenas para as populações que apresentou ajuste adequado ao modelo. Nesses casos, os fatores de resistência também foram calculados com base nos valores de GR_{50} , sendo utilizados como análise complementar à variável de controle visual.

Para as populações cujo modelo log-logístico não apresentou ajuste adequado com base nos critérios adotados, a interpretação foi realizada de forma descritiva, com base na amplitude dos valores de massa seca relativa observados ao longo das doses testadas.

Gráficos das curvas dose-resposta foram gerados para descrever o comportamento das populações em função das doses aplicadas.

Para a estimativa das doses efetivas de níveis mais elevados de resposta (ED_{80} e GR_{80}), considerou-se a possibilidade de extrapolação do modelo quando os valores estimados ultrapassaram a maior dose testada experimentalmente. Nessas situações, os resultados foram expressos como superiores à dose máxima avaliada, evitando superinterpretação de estimativas com baixa precisão decorrente da extrapolação do modelo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Glifosato

A resposta das populações de *Amaranthus spp.* ao glifosato, avaliada por meio do controle visual, está apresentada na Figura 1. Observa-se aumento progressivo do controle com o incremento das doses aplicadas, caracterizando comportamento típico de curva sigmoide. No entanto, verificou-se variabilidade entre as populações, com diferenças na inclinação das curvas e nas doses necessárias para atingir níveis elevados de controle.

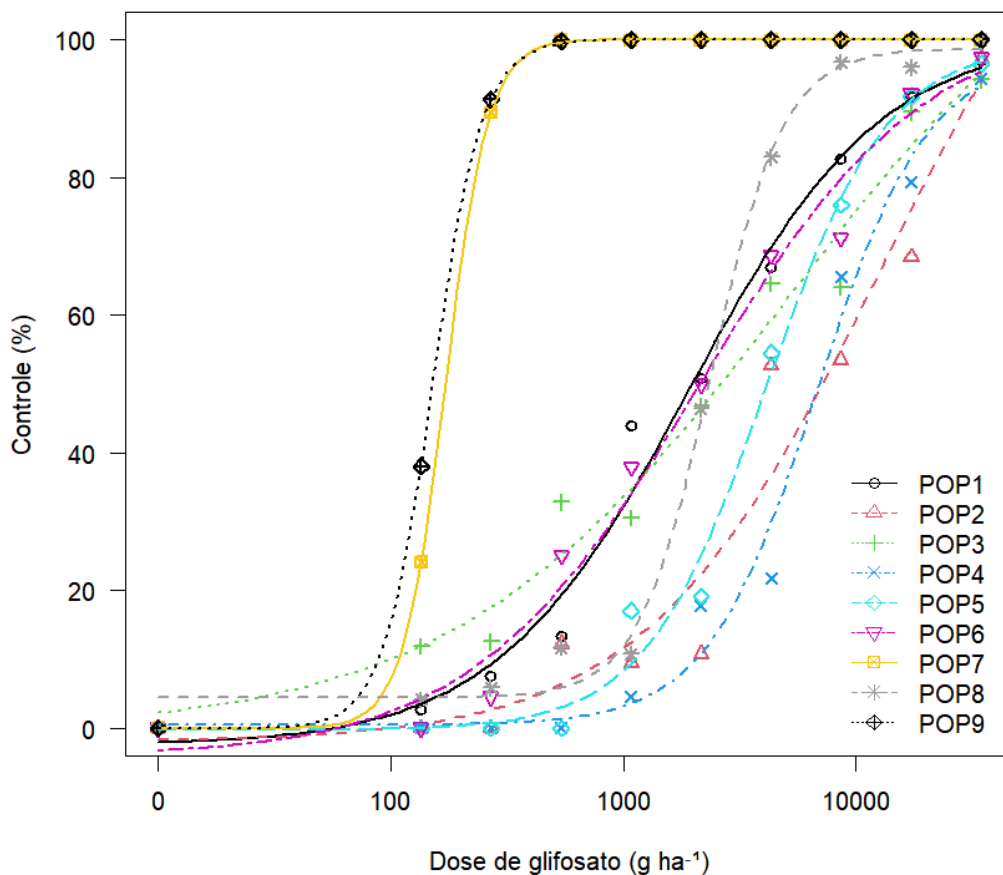


Figura 1. Curvas dose-resposta de populações de *Amaranthus spp.* ao glifosato, com base no controle (%) avaliado aos 28 dias após aplicação.

Os parâmetros do modelo log-logístico e as doses efetivas estimadas estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4), coeficiente de determinação (R^2) e doses efetivas (ED_{50} e ED_{80}) para controle (%) de populações de *Amaranthus spp.* submetidas ao glifosato.

Populações	Variável	Pmin	a	b	R^2	ED_{50}	ED_{80}	FR	Classificação
POP1	Controle	-2.48	103.26	-1.05	0.94	1907	7182	12.5	Resistente
POP2	Controle	-1.92	135.01	-0.87	0.92	12324	> 34560	81.1	Resistente
POP3	Controle	-0.36	124.65	-0.61	0.96	4959	> 34560	32.6	Resistente
POP4	Controle	0.5	97.5	-1.84	0.94	6833	14527	44.9	Resistente
POP5	Controle	-0.11	99.69	-1.67	0.91	4131	9464	27.2	Resistente
POP6	Controle	-4.02	107.56	-0.9	0.91	2103	9865	13.8	Resistente
POP7	Controle	-0.13	100.19	-4.72	0.98	172	230	1.13	Suscetível
POP8	Controle	4.46	94.23	-2.81	0.98	2381	3903	15.7	Resistente
POP9	Controle	-0.11	100.17	-4.09	1	152	213	1	Suscetível

Pmin = limite inferior da curva; a = limite superior da curva; b = inclinação da curva; ED_{50} e ED_{80} = doses efetivas estimadas; FR = fator de resistência; R^2 = coeficiente de determinação. A classificação das populações foi realizada com base na análise conjunta de FR e ED_{80} em relação à dose recomendada do herbicida.

Os valores de ED_{50} variaram de 152 a 12.324 g e.a. ha^{-1} , evidenciando elevada heterogeneidade na resposta das populações ao glifosato. As populações POP9 e POP7 apresentaram os menores valores de ED_{50} (152 e 172 g e.a. ha^{-1} , respectivamente), caracterizando maior suscetibilidade ao herbicida. Em contraste, a população POP2 apresentou o maior valor de ED_{50} (12.324 g e.a. ha^{-1}), indicando menor sensibilidade.

A integração dos valores de ED_{50} com os fatores de resistência (FR) e com as estimativas de ED_{80} permitiu uma interpretação mais robusta dos resultados. Considerando a população POP9 como referência suscetível, observou-se que a maioria das populações apresentou valores elevados de FR associados a valores de ED_{80} superiores à dose recomendada (1.080 g e.a. ha^{-1}), caracterizando resistência ao glifosato. Destaca-se a população POP2, que apresentou os maiores valores de FR, indicando elevada redução na sensibilidade. Populações como POP3, POP4 e POP5 também apresentaram níveis consistentes de resistência, enquanto POP1, POP6 e POP8

demonstraram menor sensibilidade. Por outro lado, POP7 e POP9 foram caracterizadas como suscetíveis.

Em algumas populações, foram observados valores negativos para o limite inferior da curva (Pmin), o que não possui interpretação biológica direta, refletindo apenas o ajuste matemático do modelo e indicando que a resposta tende a zero em doses elevadas. O parâmetro de inclinação (b) variou entre as populações, evidenciando diferenças na taxa de resposta às doses dos herbicidas, sendo valores mais elevados em módulo associados a respostas mais abruptas.

A resposta das populações em termos de redução da massa seca relativa está apresentada na Figura 2.

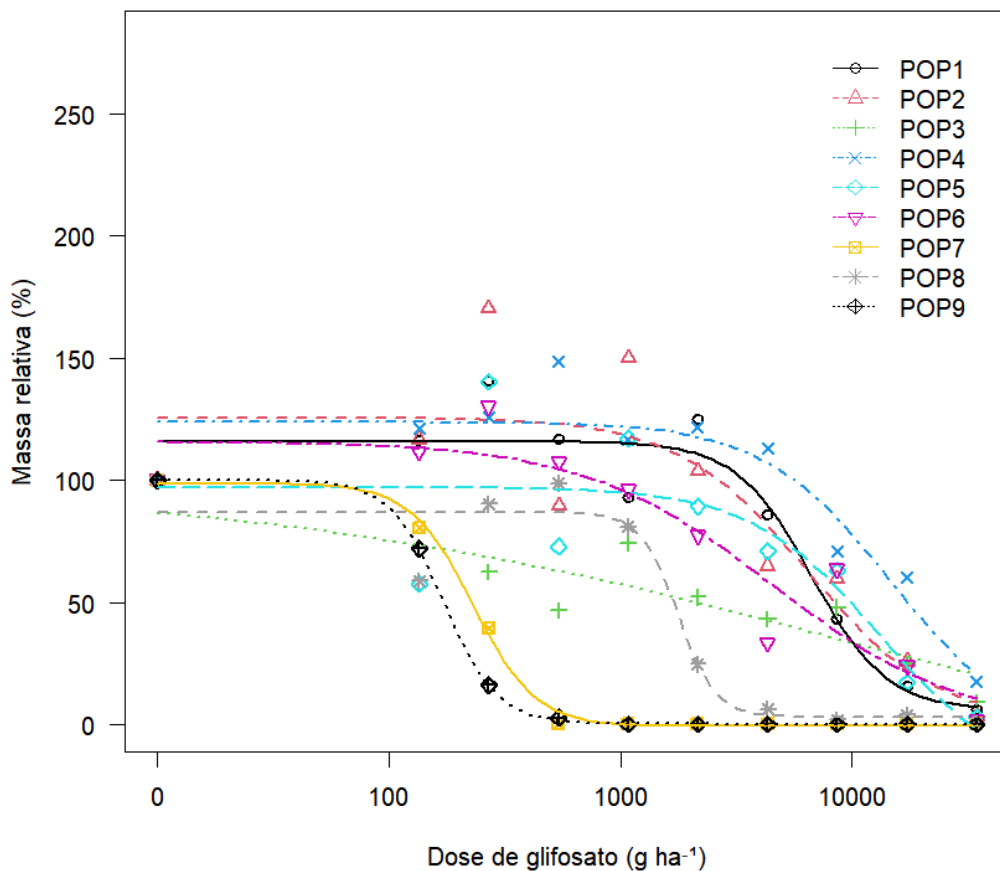


Figura 2. Curvas dose-resposta de populações de *Amaranthus* spp. ao glifosato, com base na massa seca relativa (%).

Assim como observado para o controle visual, houve redução da massa seca com o aumento

das doses de glifosato, porém com diferenças expressivas entre as populações. Os parâmetros do modelo e as doses de redução de crescimento estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros do modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4), coeficiente de determinação (R^2) e doses de redução de crescimento (GR50 e GR80) para massa seca relativa (%) de populações de *Amaranthus spp.* submetidas ao glifosato.

Populações	Variável	Pmin	a	b	R^2	GR ₅₀	GR ₈₀	FR	Classificação
POP7	Massa relativa	-0.75	99.4	3.23	0.86	231	355	1.33	Suscetível
POP9	Massa relativa	0.18	99.86	3.74	0.98	173	251	1.00	Suscetível

Pmin = limite inferior da curva; a = limite superior da curva; b = inclinação da curva; GR₅₀ e GR₈₀ = doses de redução de crescimento; FR = fator de resistência; R^2 = coeficiente de determinação.

O fator de resistência foi calculado apenas para populações com ajuste adequado do modelo.

O modelo log-logístico apresentou ajuste apenas para as populações POP7 e POP9, permitindo a estimativa confiável dos parâmetros GR₅₀ e GR₈₀. Nessas populações, os baixos valores de GR₅₀ corroboram a maior suscetibilidade observada para o controle visual, reforçando a consistência da resposta biológica.

Para as demais populações, a ausência de ajuste adequado do modelo inviabilizou a interpretação dos parâmetros de redução de crescimento, sendo adotada abordagem descritiva baseada nos valores mínimos e máximos de massa seca relativa.

Tabela 4. Valores mínimos e máximos de massa seca relativa (%) de populações de *Amaranthus spp.* submetidas ao glifosato, para aquelas cujo modelo log-logístico não apresentou ajuste.

Populações	Variável	Massa Relativa Mínima (%)	Massa Relativa Máxima (%)
POP1	Massa relativa	0	237
POP2	Massa relativa	0	281
POP3	Massa relativa	0	109
POP4	Massa relativa	0	165
POP5	Massa relativa	0	173
POP6	Massa relativa	0	191
POP8	Massa relativa	0	136

Valores de massa seca relativa expressos em porcentagem em relação à testemunha (dose zero), considerada como 100%.

A ampla amplitude observada, incluindo valores superiores a 100% em doses subletais, possivelmente associados a efeitos horméticos. Para as populações cujo modelo não apresentou ajuste, essa variabilidade reforça a interpretação baseada nos dados de controle visual.

A variabilidade observada na sensibilidade das populações de *Amaranthus spp.* ao glifosato está em consonância com diversos estudos que relatam ampla heterogeneidade de resposta dentro desse gênero. Mesmo na ausência de identificação específica das espécies avaliadas, é reconhecido que populações de *Amaranthus* podem apresentar comportamentos contrastantes quanto à suscetibilidade a herbicidas, especialmente sob histórico de uso contínuo.

Estudo recente conduzido por Oliveira et al. (2024) evidenciou redução da eficácia de glifosato e herbicidas inibidores da ALS em populações de *Amaranthus hybridus*, com a ocorrência de resistência múltipla a esses mecanismos de ação. Os autores avaliaram populações em diferentes regiões do Brasil e observaram variações expressivas na sensibilidade, incluindo casos de resistência simultânea ao glifosato e ao clorimurrom, reforçando a complexidade do manejo dessas espécies.

Resultados semelhantes têm sido reportados em estudos conduzidos no Brasil. Gonçalves Netto et al. (2016), ao avaliarem um biótipo de *Amaranthus palmeri*, observaram baixa sensibilidade ao glifosato, com necessidade de doses superiores a 8.500 g ha⁻¹ para atingir níveis de controle equivalentes à DL₅₀, além da impossibilidade de estimar DL₈₀ dentro das doses testadas. Esses resultados corroboram os elevados valores de ED₅₀ observados no presente estudo, especialmente para populações como POP2.

Além disso, os mesmos autores verificaram baixa eficiência de herbicidas inibidores da ALS, como o clorimurrom, reforçando a ocorrência de resistência múltipla aos mecanismos de ação EPSPS e ALS. Esse comportamento é particularmente relevante, uma vez que herbicidas ALS são frequentemente utilizados como alternativa ao glifosato no manejo de populações resistentes, o que aumenta a pressão de seleção e favorece a evolução de resistência múltipla.

A resistência ao glifosato em espécies do gênero *Amaranthus* tem sido amplamente associada à amplificação do gene EPSPS, conforme demonstrado por Gaines et al. (2010), resultando em aumento da quantidade da enzima alvo e consequente redução da eficácia do herbicida. De forma complementar, Ward et al. (2013) destacam que espécies como *Amaranthus*

palmeri apresentam elevada variabilidade genética e elevada capacidade adaptativa, favorecendo a rápida evolução de resistência sob pressão de seleção.

A presença de populações altamente suscetíveis neste estudo (POP7 e POP9) e populações com resistência, com destaque para POP2, POP3, POP4 e POP5, indica a coexistência de diferentes níveis de seleção nas áreas de origem dessas populações. Esse padrão é consistente com a dinâmica evolutiva descrita para o gênero *Amaranthus*, no qual diferentes biótipos podem coexistir em função do histórico de manejo e da intensidade de uso de herbicidas.

Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a necessidade de adoção de estratégias de manejo integrado de plantas daninhas, incluindo a rotação de mecanismos de ação, o uso de herbicidas com diferentes modos de ação e o monitoramento contínuo das populações, visando evitar a seleção e disseminação de biótipos resistentes. De maneira geral, a concordância entre os resultados de controle visual e massa seca relativa confere robustez às conclusões do estudo, evidenciando que ambas as variáveis são adequadas para caracterizar a resposta de populações de *Amaranthus spp.* ao glifosato.

A variabilidade na resposta das populações também pode ser observada visualmente nas pranchas apresentadas nos Anexos 9 e 10.

5.2 Clorimuirom

A resposta das populações de *Amaranthus spp.* ao herbicida clorimuirom evidenciou elevada variabilidade na sensibilidade, tanto para a variável controle quanto para a massa seca relativa. De modo geral, observou-se comportamento diferencial entre as populações, com a ocorrência de indivíduos altamente suscetíveis e outros com menor sensibilidade ao herbicida.

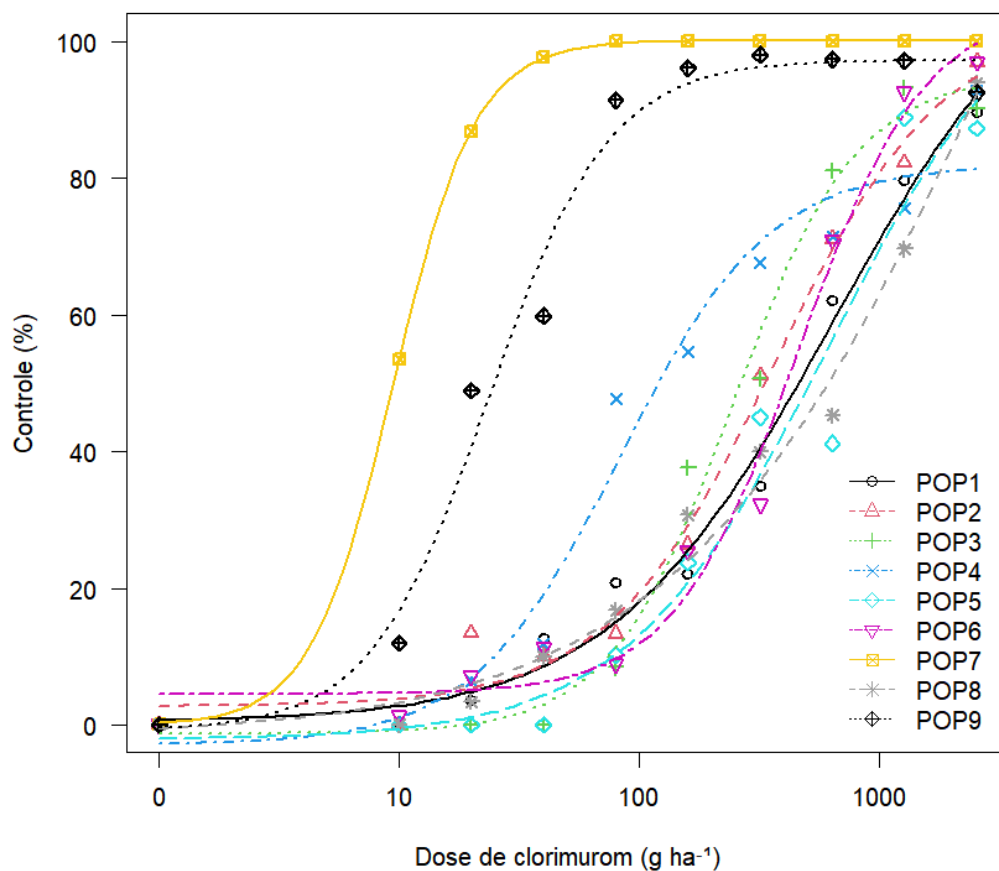


Figura 3. Curvas dose–resposta para controle (%) de populações de *Amaranthus spp.* submetidas a diferentes doses de clorimuirom.

Para a variável controle, os parâmetros do modelo e as doses efetivas estimadas estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros do modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4), coeficiente de determinação (R^2) e doses efetivas (ED_{50} e ED_{80}) para controle (%) de populações de *Amaranthus spp.* submetidas ao clorimurum.

Populações	Variável	Pmin	a	b	R^2	ED_{50}	ED_{80}	FR	Classificação
POP1	Controle	0.42	117.37	-0.93	0.97	647	> 2560	71.9	Resistente
POP2	Controle	2.56	101.01	-1.23	0.98	369	1142	41.0	Resistente
POP3	Controle	-1.44	96.63	-1.68	0.97	246	562	27.3	Resistente
POP4	Controle	-2.9	84.86	-1.41	0.96	84	225	9.3	Resistente
POP5	Controle	-0.12	110.03	-1.11	0.9	608	2123	67.5	Resistente
POP6	Controle	4.46	100.99	-1.65	0.98	464	1074	51.5	Resistente
POP7	Controle	-0.1	100.21	-2.53	1	9	16	1.00	Suscetível
POP8	Controle	-2.65	292.49	-0.57	0.98	> 2560	> 2560	>284	Resistente
POP9	Controle	-0.97	98.21	-1.75	0.97	24	53	2.7	Suscetível

Pmin = limite inferior da curva; a = limite superior da curva; b = inclinação da curva; ED_{50} e ED_{80} = doses efetivas estimadas; FR = fator de resistência; R^2 = coeficiente de determinação. A classificação das populações foi realizada com base na análise conjunta de FR e ED_{80} em relação à dose recomendada do herbicida.

Os valores de ED_{50} variaram de 9 g i.a. ha^{-1} , para a população POP7, até valores superiores a 2.560 g i.a. ha^{-1} , como observado para a população POP8. As populações POP7 e POP9 apresentaram maior suscetibilidade ao herbicida, enquanto populações como POP1, POP5, POP6 e, principalmente, POP8 apresentaram menor sensibilidade.

A análise integrada dos fatores de resistência (FR) e dos valores de ED_{80} permitiu caracterizar de forma mais precisa os níveis de resistência ao clorimurum. Considerando a população POP7 como referência suscetível, observou-se que diversas populações apresentaram valores elevados de FR associados a ED_{80} superiores à dose recomendada (80 g i.a. ha^{-1}), caracterizando resistência ao herbicida. A população POP8 destacou-se por apresentar os maiores níveis de resistência, com ausência de controle mesmo em doses elevadas. Populações como POP1, POP5 e POP6 também apresentaram resistência expressiva, enquanto POP2 e POP3 indicaram níveis intermediários de baixa de sensibilidade. Por outro lado, POP7 foi caracterizada como suscetível, enquanto POP9 apresentou comportamento próximo à suscetibilidade.

A resposta das populações em termos de massa seca relativa está apresentada na Figura 4.

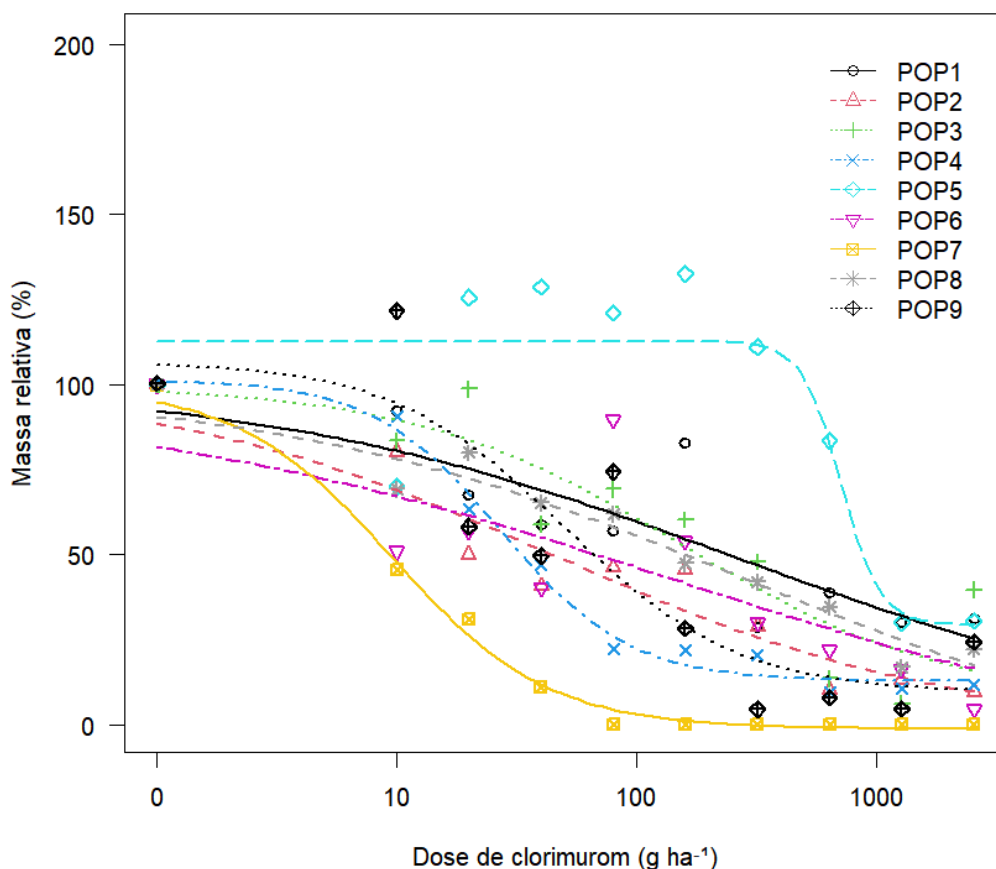


Figura 4. Curvas dose–resposta para massa seca relativa (%) de populações de *Amaranthus* spp. submetidas a diferentes doses de clorimurrom.

Para a variável massa seca relativa, observou-se variabilidade no ajuste do modelo entre as populações, com valores de coeficiente de determinação (R^2) indicando que nem todos os ajustes foram satisfatórios. Nesse contexto, apenas as populações POP4 e POP7 apresentaram ajuste adequado ao modelo, permitindo a interpretação confiável dos parâmetros GR_{50} e GR_{80} . Para as demais populações, a baixa qualidade do ajuste inviabiliza a interpretação dos parâmetros estimados. Dessa forma, a análise foi realizada com base na amplitude da massa seca relativa observada ao longo das doses testadas, sendo os parâmetros ajustados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros do modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4), coeficiente de determinação (R^2) e doses de redução de crescimento (GR_{50} e GR_{80}) para massa seca relativa (%) de populações de *Amaranthus spp.* submetidas ao clorimurrom.

Populações	Variável	Pmin	a	b	R^2	GR_{50}	GR_{80}	FR	Classificação
POP4	Massa relativa	12.93	88.45	1.62	0.9	27	64	2.7	Baixa sensibilidade
POP7	Massa relativa	-1.32	100.83	1.33	0.85	10	27	1.0	Suscetível

Pmin = limite inferior da curva; a = limite superior da curva; b = inclinação da curva; GR_{50} e GR_{80} = doses de redução de crescimento; FR = fator de resistência; R^2 = coeficiente de determinação. O fator de resistência foi calculado apenas para populações com ajuste adequado do modelo.

O ajuste do modelo log-logístico foi satisfatório apenas para as populações POP4 e POP7. Nessas populações, os valores de GR_{50} corroboram os resultados obtidos para o controle visual, indicando maior suscetibilidade de POP7 e baixa sensibilidade em POP4.

Para as demais populações, cujo modelo não apresentou ajuste, a resposta foi descrita com base nos valores mínimos e máximos de massa seca relativa observados ao longo das doses testadas, apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Valores mínimos e máximos de massa seca relativa (%) de populações de *Amaranthus spp.* submetidas ao clorimurrom, para aquelas cujo modelo log-logístico não apresentou ajuste.

Populações	Variável	Massa Relativa Mínima (%)	Massa Relativa Máxima (%)
POP1	Massa relativa	3	138
POP2	Massa relativa	0	115
POP3	Massa relativa	0	148
POP5	Massa relativa	0	201
POP6	Massa relativa	0	156
POP8	Massa relativa	15	174
POP9	Massa relativa	0	153

Valores de massa seca relativa expressos em porcentagem em relação à testemunha (dose zero), considerada como 100%.

A elevada amplitude dos valores de massa seca relativa ao longo das doses reforça a variabilidade na resposta ao herbicida, corroborando os resultados observados para o controle visual. Em algumas populações, especialmente nas estimativas em doses mais elevadas, observou-se aumento da variabilidade dos dados, refletindo em menor precisão dos parâmetros estimados pelo modelo. Essa condição foi evidenciada pela ocorrência de valores extrapolados para ED_{80} e

GR₈₀, indicando limitações do ajuste em níveis elevados de resposta, situação comum em estudos de curvas dose–resposta quando a resposta biológica não atinge o patamar máximo dentro da faixa de doses testadas.

A variabilidade observada na resposta ao clorimuirom está em consonância com estudos prévios que relatam diferenças expressivas na suscetibilidade de espécies do gênero *Amaranthus* a herbicidas inibidores da ALS. Francischini et al. (2013) demonstraram ampla variação na eficiência desses herbicidas, evidenciando a presença de indivíduos com menor sensibilidade dentro de populações aparentemente homogêneas.

Além disso, a presença de populações menos sensíveis ao clorimuirom pode estar associada à evolução de resistência a herbicidas inibidores da ALS, um dos mecanismos de ação com maior número de casos de resistência registrados mundialmente. Esse tipo de resistência está frequentemente relacionado a mutações no sítio de ação da enzima ALS, resultando na redução da afinidade do herbicida e consequente diminuição da eficácia de controle (Tranel; Wright, 2002; Beckie; Tardif, 2012).

No contexto brasileiro, estudos recentes têm evidenciado a ocorrência de resistência múltipla em espécies do gênero *Amaranthus*, incluindo redução da eficácia de herbicidas inibidores da ALS, como o clorimuirom. Oliveira et al. (2024) observaram variabilidade significativa na sensibilidade de populações de *Amaranthus hybridus*, com relatos de resistência simultânea a inibidores da EPSPS e ALS, reforçando o risco de seleção de biótipos com múltiplos mecanismos de resistência.

Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo evidenciam que o clorimuirom apresenta eficiência variável no controle de populações de *Amaranthus spp.*, indicando a presença de indivíduos com menor sensibilidade ao herbicida. Esse comportamento está associado à variabilidade observada entre as populações avaliadas, com destaque para POP7, que apresentou maior suscetibilidade, e para POP1, POP5, POP6 e POP8, que demonstraram resistência mais acentuada. Esse padrão reforça a coexistência de biótipos com diferentes níveis de seleção nas áreas de origem dessas populações, possivelmente associada ao histórico de uso de herbicidas inibidores da ALS. De maneira geral, a concordância entre os resultados de controle visual e massa seca relativa confere robustez às interpretações obtidas, evidenciando que ambas as variáveis são

adequadas para caracterizar a resposta de populações de *Amaranthus spp.* ao clorimurrom.

A variabilidade na resposta das populações também pode ser observada visualmente nas pranchas apresentadas nos Anexos 11 e 12.

5.3 Implicações dos resultados para o manejo de *Amaranthus spp.*

Os resultados deste estudo, que evidenciaram populações de *Amaranthus spp.* com resistência aos herbicidas glifosato (HRAC 9) e clorimurrom (HRAC 2), indicam a necessidade de reestruturação das estratégias de manejo adotadas em campo, com foco na diversificação de mecanismos de ação e na integração de práticas de controle.

No manejo em pré-emergência, o uso de herbicidas residuais constitui a base do controle, destacando-se a associação de inibidores da PROTOX (HRAC 14), como flumioxazin e sulfentrazone, com herbicidas de ação complementar, como piroxasulfone (HRAC 15) e S-metolachlor (HRAC 15). Combinações como flumioxazin + piroxasulfone, flumioxazin + S-metolachlor e sulfentrazone + S-metolachlor apresentam elevada eficiência no controle inicial. Alternativamente, podem ser utilizadas associações com trifluralina (HRAC 3), desde que o produto atinja o solo, garantindo sua incorporação e eficácia.

Em pós-emergência das plantas invasoras, o manejo deve priorizar herbicidas com mecanismos alternativos, com destaque para os auxínicos (HRAC 4), como 2,4-D, dicamba e fluroxypyr, além dos inibidores da PROTOX (HRAC 14), como fomesafen, lactofen e saflufenacil. O uso de glufosinato de amônio (HRAC 10), em cultivares de soja tolerantes, constitui ferramenta importante, especialmente em aplicações precoces.

No cultivo do milho e sorgo, a redução da eficácia da atrazina (HRAC 5) no controle de *Amaranthus spp.* tem sido relatada na literatura, indicando a evolução de resistência (RIELEY et al., 2025; BESANÇON et al., 2026; NORSWORTHY et al., 2012). Nesse contexto, a utilização de terbutilazina (HRAC 5), em substituição à atrazina, pode contribuir para o controle dessas populações. No entanto, seu uso deve ser inserido em programas que envolvam a rotação e associação com herbicidas de diferentes mecanismos de ação, a fim de reduzir a pressão de seleção.

Considerando a realidade do estado de Goiás, especialmente nas regiões de coleta das

populações avaliadas, é comum a sucessão de soja na primeira safra, seguida por milho, sorgo ou milheto na segunda safra. Essa dinâmica de cultivo representa uma oportunidade estratégica para o manejo de *Amaranthus spp.*, permitindo a diversificação de herbicidas ao longo do sistema produtivo e contribuindo para a redução da pressão de seleção sobre mecanismos de ação específicos.

Adicionalmente, a rotação de culturas, aliada ao uso de práticas culturais como plantas de cobertura, aumento da densidade de semeadura e redução do espaçamento entre linhas, contribui para a supressão das plantas daninhas. Dessa forma, a integração entre métodos químicos e culturais constitui a estratégia mais eficiente para o manejo de populações resistentes e para a sustentabilidade dos sistemas produtivos a longo prazo.

Ressalta-se, contudo, que a escolha dos herbicidas deve considerar as culturas subsequentes no sistema de produção, em função do potencial de residual no solo e dos intervalos de segurança para rotação. Herbicidas com maior persistência, como inibidores da ALS (HRAC 2), PROTOX (HRAC 14) e alguns inibidores da síntese de lipídios (HRAC 15), podem apresentar risco de fitotoxicidade para culturas sensíveis em sucessão, especialmente em condições de baixa precipitação ou solos com menor teor de matéria orgânica. Dessa forma, é fundamental observar as recomendações de bula quanto aos períodos de plantio subsequente, garantindo a seletividade das culturas e evitando perdas produtivas.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos confirmam a existência de ampla variabilidade na sensibilidade de populações de *Amaranthus spp.* aos herbicidas glifosato e clorimurrom, evidenciada por meio da metodologia de curvas dose-resposta.

A análise integrada dos parâmetros ED₅₀, ED₈₀ e dos fatores de resistência (FR) permitiu a identificação de populações com resistência confirmada, caracterizadas pela necessidade de doses superiores às recomendadas para atingir níveis satisfatórios de controle.

Para o glifosato, a maioria das populações avaliadas apresentou resistência, com destaque para POP2, POP3, POP4 e POP5, enquanto POP7 e POP9 foram caracterizadas como suscetíveis. Para o clorimurrom, observou-se ocorrência ainda mais acentuada de resistência, com destaque para POP1, POP5 e POP8, enquanto populações como POP7 e POP9 apresentou comportamento suscetível.

Esses resultados indicam a ocorrência de biótipos com resistência múltipla aos mecanismos de ação EPSPS e ALS em populações de *Amaranthus spp.* no estado de Goiás, evidenciando a necessidade da adoção de estratégias de manejo integrado.

7. REFERÊNCIAS

- ANDRADE JÚNIOR, E. R. et al. Resistência de *Amaranthus palmeri* ao herbicida glifosato no Brasil. Revista Cultivar, Pelotas, 2015.
- BAYÓN, D. N. Identifying the weedy Amaranths (*Amaranthus*, Amaranthaceae) of South America. Advances in Weed Science, v. 20, n. 2, p. 1-9, 2022.
- BECKIE, H. J.; TARDIF, F. J. Herbicide cross resistance in weeds. Crop Protection, v. 35, p. 15-28, 2012.
- BESANÇON, T. E. et al. Detection and confirmation of atrazine-resistant Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) in the Northeastern United States. *Weed Science*, 2026.
- CARVALHO, S. J. P. et al. Susceptibility of *Amaranthus palmeri* to glyphosate in Brazil. Planta Daninha, v. 33, n. 3, p. 1-8, 2015.
- DÉLYE, C. Weed resistance to acetyl coenzyme A carboxylase inhibitors: an update. Weed Science, v. 53, p. 728-746, 2005.
- FARHANGI-ABRIZ, S. Integrated management strategies to reduce herbicide use in agriculture. Journal of Arid Agriculture, v. 2, p. 31-34, 2016.
- FRANCISCHINI, A. C. et al. Curvas de dose-resposta e eficácia de herbicidas inibidores da ALS aplicados em pré-emergência sobre espécies de *Amaranthus*. Revista Brasileira de Herbicidas, v. 12, n. 1, p. 68-77, 2013.
- GAINES, T. A. et al. Gene amplification confers glyphosate resistance in *Amaranthus palmeri*. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 107, p. 1029-1034, 2010.
- GONÇALVES NETTO, A. et al. Low susceptibility of *Amaranthus palmeri* to glyphosate and chlorimuron-ethyl: evidence of multiple resistance. Planta Daninha, Piracicaba, 2016.
- HEAP, I. The international survey of herbicide resistant weeds. Disponível em: <http://www.weedscience.com>. Acesso em: 27 fev. 2026.
- HEAP, I. International survey of herbicide resistant weeds. Disponível em: <http://www.weedscience.com>. Acesso em: 27 fev. 2026.
- HOLM, L. G. et al. World weeds: natural histories and distribution. New York: John Wiley & Sons, 1997.

KISSMANN, K. G.; GROTH, D. Plantas infestantes e nocivas. 2. ed. São Bernardo do Campo: BASF, 1999.

LORENZI, H. Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas. 4. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2008.

NETTO, A. G. Crescimento e desenvolvimento, resistência múltipla aos herbicidas inibidores da EPSPS-ALS e alternativas em pós-emergência para controle de *Amaranthus palmeri*. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

NEVE, P. et al. Modeling evolution and management of glyphosate resistance in *Amaranthus palmeri*. *Weed Research*, v. 54, p. 1-12, 2014.

OLIVEIRA, M. C. et al. Emergence of multiple resistance to EPSPS and ALS herbicides in smooth pigweed (*Amaranthus hybridus*): a growing concern in Brazil. *Weed Science*, 2024.

POWLES, S. B.; YU, Q. Evolution in action: plants resistant to herbicides. *Annual Review of Plant Biology*, v. 61, p. 317-347, 2010.

RAIMONDI, M. A. et al. Dose-response curves and susceptibility of *Amaranthus spp.* to herbicides. *Planta Daninha*, v. 33, p. 1-10, 2015.

RIELEY, M. B. et al. Glyphosate- and atrazine-resistant Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*): confirmation and management with alternative herbicides. *Weed Technology*, v. 39, 2025.

SEEFELDT, S. S.; JENSEN, J. E.; FUERST, E. P. Log-logistic analysis of herbicide dose-response relationships. *Weed Technology*, v. 9, p. 218-227, 1995.

SZÉKÁCS, A.; DARVAS, B. Forty years with glyphosate. In: HASANEEN, M. N. (Ed.). *Herbicides: properties, synthesis and control of weeds*. Rijeka: InTech, 2011. p. 247-284.

TRANDEL, P. J.; WRIGHT, T. R. Resistance of weeds to ALS-inhibiting herbicides. *Weed Science*, v. 50, p. 700-712, 2002.

VARGAS, L.; ROMAN, E. S.; SILVA, A. A.; et al. Resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil: histórico, distribuição e manejo. *Planta Daninha*, v. 31, n. 3, p. 701-715, 2013.

VERECKEN, H. Mobility and leaching of glyphosate: a review. *Pest Management Science*, v. 61, p. 1139-1151, 2005.

WARD, S. M.; WEBSTER, T. M.; STECKEL, L. E. Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*): a review. *Weed Technology*, v. 27, p. 12-27, 2013.

WEBSTER, T. M.; GREY, T. L. Morphology, growth, and seed production of glyphosate-resistant *Amaranthus palmeri*. *Weed Science*, v. 63, n. 1, p. 264-272, 2015.

9. ANEXOS



Anexo 1. Casa de vegetação utilizada na condução do experimento.



Anexo 2. Distribuição dos vasos no experimento.



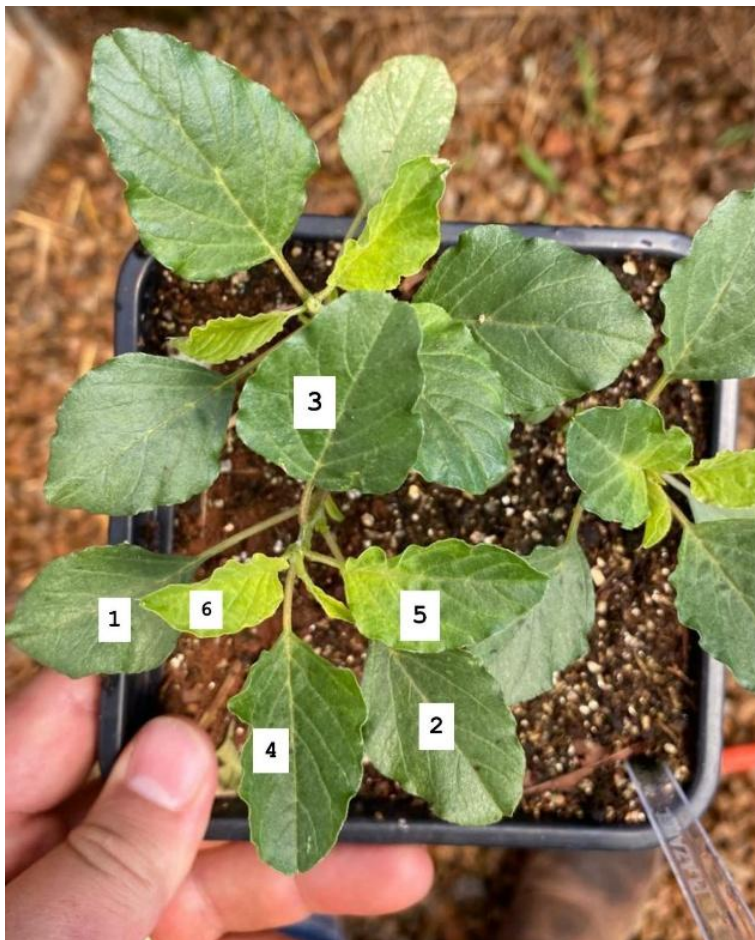
Anexo 3. Semeadura de *Amaranthus spp.*



Anexo 4. Emergência das plântulas.



Anexo 5. Desbaste das plantas.



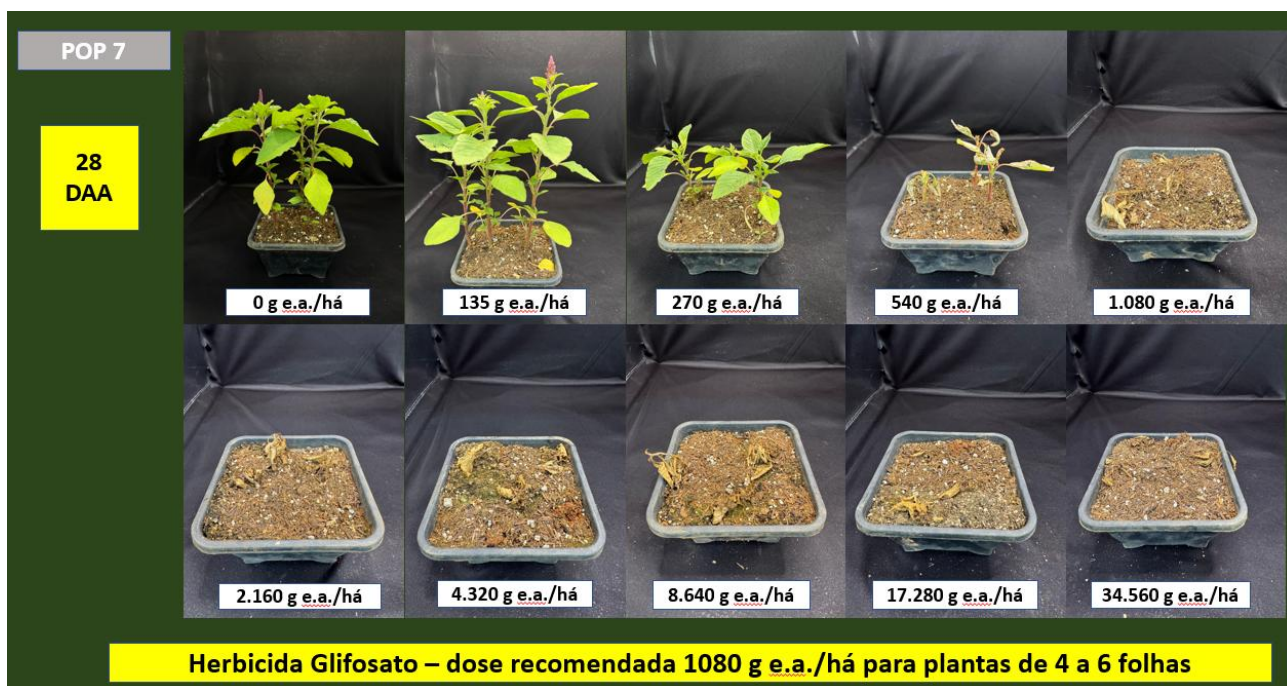
Anexo 6. Aplicação dos herbicidas.



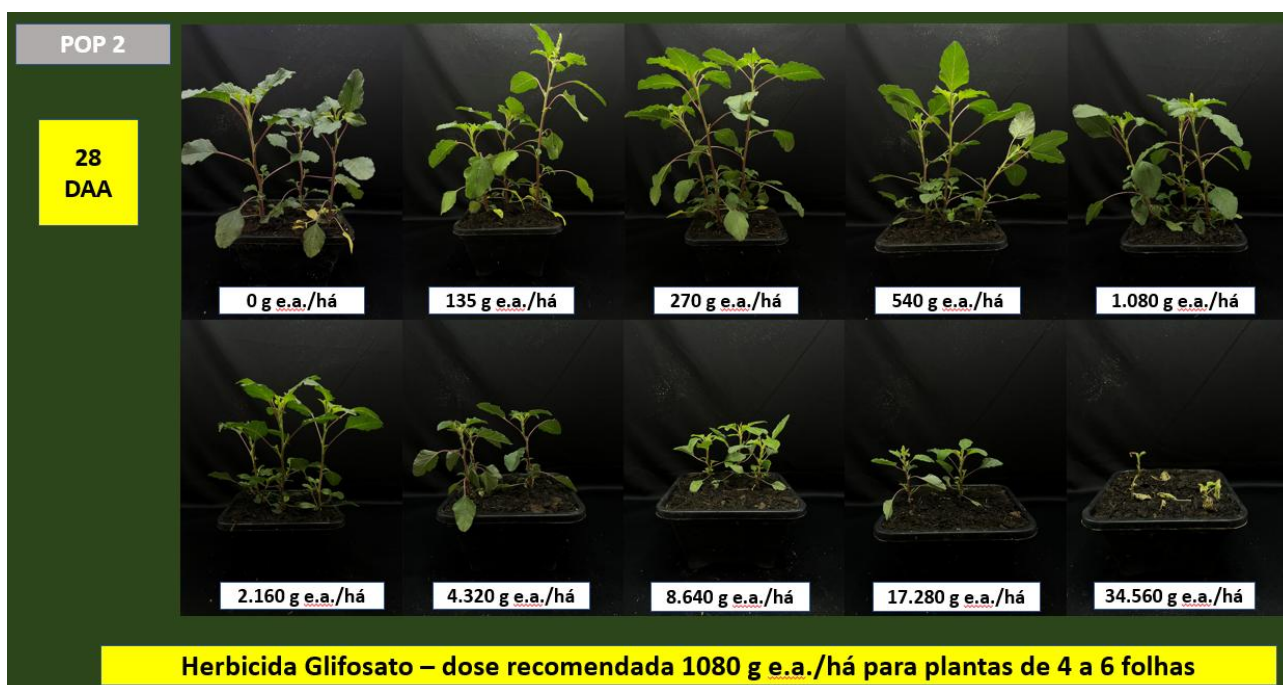
Anexo 7. Coleta das plantas para massa seca.



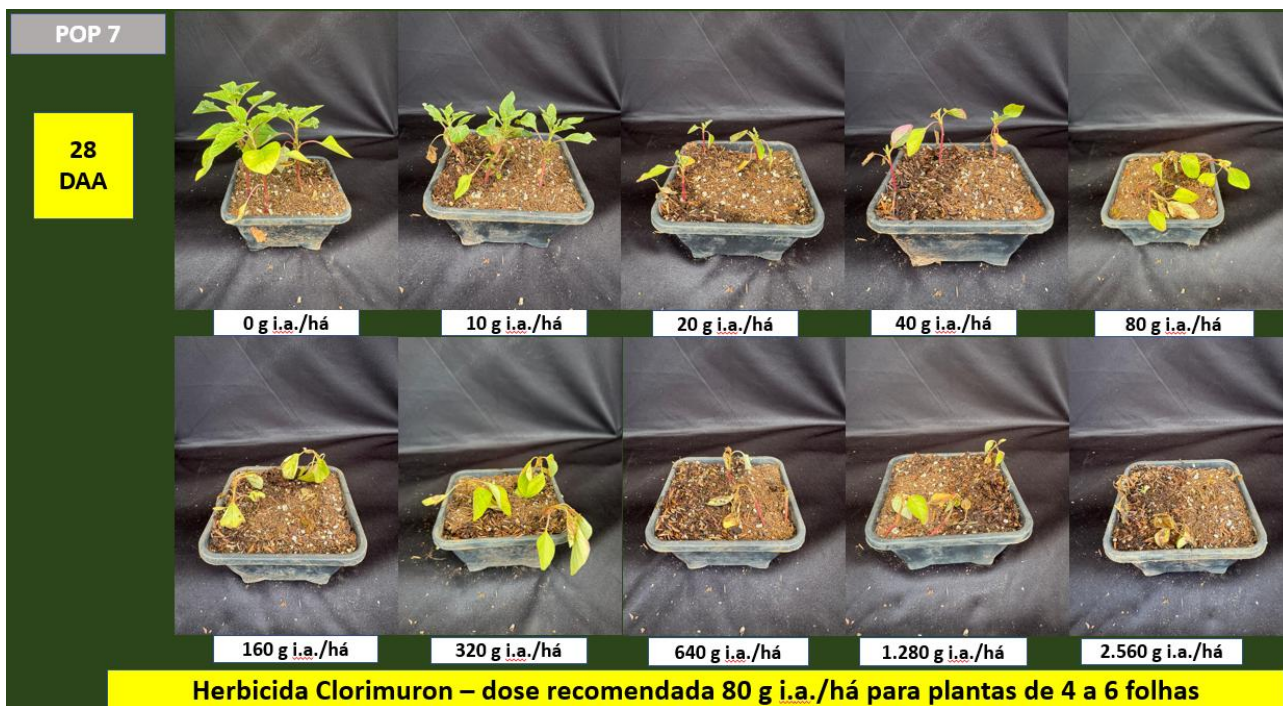
Anexo 8. Secagem em estufa.



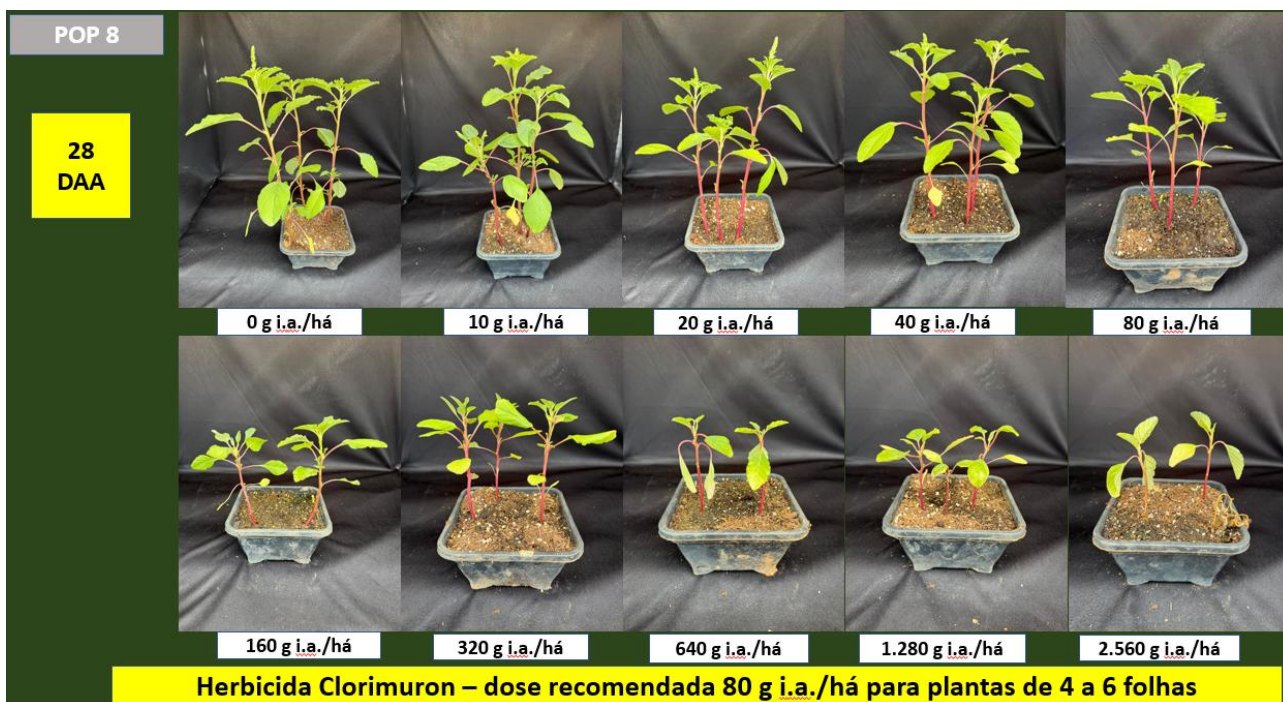
Anexo 9. Resposta visual de populações de *Amaranthus spp.* contrastantes quanto à sensibilidade ao glifosato, evidenciando uma população suscetível (POP7) em diferentes níveis de dose.



Anexo 10. Resposta visual de populações de *Amaranthus spp.* contrastantes quanto à sensibilidade ao glifosato, evidenciando uma população resistente (POP2) em diferentes níveis de dose.



Anexo 11. Resposta visual de populações de *Amaranthus spp.* contrastantes quanto à sensibilidade ao clorimurum, evidenciando uma população suscetível (POP7) em diferentes níveis de dose.



Anexo 12. Resposta visual de populações de *Amaranthus spp.* contrastantes quanto à sensibilidade ao clorimurum, evidenciando uma população resistente (POP8) em diferentes níveis de dose.