



BACHARELADO EM AGRONOMIA

**Curva dose-resposta do herbicida Metribuzin e a cultura do pepino
como planta bioindicadora para diferentes tipos de solos do estado de
Goiás**

JOÃO PAULO RODRIGUES DOS SANTOS

**Hidrolândia, GO
2026**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS HIDROLÂNDIA**

BACHARELADO EM AGRONOMIA

**Curva dose-resposta do herbicida Metribuzin e a cultura do pepino
como planta bioindicadora para diferentes tipos de solos do estado de
Goiás**

JOÃO PAULO RODRIGUES DOS SANTOS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto Federal Goiano
– Campus Hidrolândia, como requisito
parcial para a obtenção do Grau de
Bacharel em Agronomia.


Orientador: Dr. Marco Antonio Moreira de Freitas

Hidrolândia - Go
Junho, 2026


JOÃO PAULO RODRIGUES DOS SANTOS

Curva dose-resposta do herbicida Metribuzin e a cultura do pepino como planta bioindicadora para diferentes tipos de solos do estado de Goiás


Trabalho de Conclusão de Curso DEFENDIDO e APROVADO em 28 de maio de 2026, pela Banca Examinadora constituída pelos membros

Documento assinado digitalmente
 **MARCO ANTONIO MOREIRA DE FREITAS**
Data: 16/06/2026 18:14:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marco Antonio Moreira
Instituto Federal Goiano

Documento assinado digitalmente
 **LILIAN ROSANA SILVA RABELO**
Data: 18/06/2026 11:18:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Lilian Rosana Silva
Instituto Federal Goiano

Documento assinado digitalmente
 **JACSON ZUCHI**
Data: 18/06/2026 10:41:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jacson Zuchi
Instituto Federal Goiano

Hidrolândia - GO
Junho, 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 type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Joao Paulo Rodrigues dos Santos

Matrícula:

2021211200240364

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIIF Goiano: 13 / 06 / 2026

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 inclusos 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.

Hidrolândia > GO

13 / 06 / 2026

Documento assinado digitalmente



JOÃO PAULO RODRIGUES DOS SANTOS

Data: 13/06/2026 16:10:43-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Local

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a) 

Documento assinado digitalmente

MARCO ANTONIO MOREIRA DE FREITAS

Data: 15/06/2026 18:06:55-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

R696 Santos, João Paulo Rodrigues dos
Curva dose-resposta do herbicida Metribuzin e a cultura do pepino como planta bioindicadora para diferentes tipos de solos do estado de Goiás / João Paulo Rodrigues dos Santos.
Hidrolândia 2026.
29f. il.
Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Moreira Freitas.
Monografia (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 1120024 - Bacharelado em Agronomia - Hidrolândia (Campus Hidrolândia).
1. Fitotoxicidade. 2. Adsorção. 3. Manejo de solos. I. Título.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Biomassa seca da parte aérea de pepino cultivado em diferentes solos na ausência de herbicida	19
Figura 2 - Fitotoxicidade do herbicida metribuzin em função da dose e do tempo de avaliação no solo RQo	20
Figura 3 - Fitotoxicidade do herbicida metribuzin em função da dose e do tempo de avaliação no solo LVdf	22
Figura 4 - Fitotoxicidade do herbicida metribuzin em função da dose e do tempo de avaliação no solo CXbd	23
Figura 5 - Fitotoxicidade do herbicida metribuzin em função da dose e do tempo de avaliação no solo LVd	25
Figura 6 - Fitotoxicidade do herbicida metribuzin em função da dose e do tempo de avaliação no solo LVw	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos físico-químicos das cinco classes de solos avaliadas	14
--	-----------

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
2.1. Metribuzin.....	10
2.2. Comportamento de Herbicidas no Solo.....	10
2.3. Influência da Textura e Matéria Orgânica.....	10
2.4. Bioindicadores.....	11
2.5. Curvas Dose-Resposta.....	12
3. METODOLOGIA.....	13
3.1. Localização e características do ambiente experimental.....	13
3.2. Delineamento experimental e preparo dos materiais.....	13
3.3. Caracterização e preparo dos solos.....	14
3.4. Plantio da espécie bioindicadora.....	14
3.5. Tratamentos e aplicação do herbicida.....	14
3.6. Condução do experimento e manejo de irrigação.....	15
3.7. Avaliações e coleta de dados.....	16
3.8. Análise estatística.....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
4.1. Resultados gerais obtidos no experimento.....	18
4.2. Desenvolvimento inicial e potencial produtivo basal (Testemunha).....	18
4.3. Resposta do solo RQo.....	20
4.4. Resposta do solo LVdf.....	21
4.5. Resposta do solo CXbd.....	23
4.6. Resposta do solo LVd.....	24
4.7. Resposta do solo LVw.....	26
5. CONCLUSÃO.....	28
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29

RESUMO

O uso de herbicidas pré-emergentes exige o conhecimento da interação entre a molécula e os atributos do solo para garantir a eficácia biológica e a segurança ambiental. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência dos atributos físico-químicos de cinco classes de solos no efeito residual do metribuzin, utilizando o pepino (*Cucumis sativus*) como planta bioindicadora. O experimento foi conduzido no Instituto Federal Goiano, em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições. Testaram-se cinco doses de metribuzin (0; 0,25x; 0,5x; 1,0x e 2,0x) em cinco solos: RQo, CXbd, LVd, LVdf e LVw. Foram realizadas avaliações visuais de fitotoxicidade aos 7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação (DAA) e a determinação da biomassa seca da parte aérea ao final do período. Os resultados indicam que o teor de argila e a CTC estiveram fortemente associados à biodisponibilidade do herbicida. No solo arenoso (RQo), observou-se morte total das plantas em todas as doses tratadas a partir dos 14 DAA. Em contraste, o solo argilo-oxidico (LVdf) proporcionou maior proteção ao bioindicador, permitindo a sobrevivência das plantas na menor dosagem até os 28 DAA. Os dados de biomassa seca confirmaram o dano severo do herbicida, exibindo redução de 100% na massa das plantas em quase todas as matrizes tratadas, correlacionando-se diretamente com o colapso visual do bioindicador. Conclui-se que solos com maior poder tampão retêm mais intensamente o metribuzin, atenuando sua fitotoxicidade imediata, enquanto solos de textura leve potencializam a ação do produto devido à baixa adsorção

Palavras-chave: Fitotoxicidade. Adsorção. Manejo de solos. Bioindicador.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira é base de ampla produção e, para manter elevada produtividade, o controle de plantas daninhas é essencial. Nesse contexto, o uso de herbicidas representa uma das práticas mais eficientes para reduzir a competição por luz, água e nutrientes, favorecendo o desenvolvimento das culturas (SILVA, FERREIRA & SANTOS, 2021). A partir da década de 1970, quando herbicidas como o metribuzin foram introduzidos no país (RODRIGUES & ALMEIDA, 2011), essa molécula tornou-se fundamental para o manejo químico no Brasil.

Assim, diante da variabilidade edáfica — especialmente em estados com diversidade de solos como o Goiás — torna-se essencial investigar a resposta de bioindicadores vegetais à aplicação de metribuzin em diferentes solos. Esse conhecimento pode subsidiar recomendações de doses mais precisas e regionais, minimizando riscos ambientais e melhorando a eficiência do controle de plantas daninhas (LIMA, 2021).

Portanto, considerando a variabilidade dos atributos físico-químicos dos solos do estado de Goiás e sua influência sobre o comportamento de herbicidas residuais, este trabalho teve como objetivo avaliar a resposta do pepino (*Cucumis sativus* L.), utilizado como planta bioindicadora, à aplicação de diferentes doses de metribuzin em distintas classes de solos. Especificamente, buscou-se quantificar a fitotoxicidade e a produção de biomassa seca das plantas, bem como relacionar essas respostas aos atributos físicos e químicos dos solos, visando compreender como as características edáficas influenciam a biodisponibilidade e o efeito residual do herbicida.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Metribuzin

O metribuzin é um herbicida pertencente à classe das triazinonas, amplamente utilizado e registrado no Brasil para uso em pré-emergência em culturas de grande importância econômica, como soja, batata, cana-de-açúcar e tomate. É uma molécula amplamente reconhecida pela alta eficiência no controle de plantas daninhas de folhas largas e de algumas gramíneas.

Seu mecanismo de ação consiste na inibição do fotossistema II (PSII), o que interrompe o transporte de elétrons durante a etapa fotoquímica da fotossíntese, inviabilizando a produção de energia e o crescimento das plantas suscetíveis (Lima, 2021).

2.2. Comportamento de Herbicidas no Solo

O destino e o comportamento de herbicidas no ambiente são fortemente influenciados pelas características físico-químicas do meio edáfico. Esses fatores determinam processos dinâmicos essenciais como a sorção, a dessorção, a mobilidade, a persistência e o potencial de *carryover*, que variam significativamente de acordo com a classe de solo avaliada e impactam de forma direta tanto a eficácia agrônômica quanto a segurança ambiental da aplicação (Lima, 2021).

Além dos processos físico-químicos, a degradação microbiana consolida-se como um dos principais mecanismos responsáveis pela dissipação do metribuzin na matriz do solo. A intensidade e a velocidade dessa degradação biológica são dependentes do histórico de uso do herbicida na área, da temperatura, da umidade e da atividade microbiana geral do solo. Trabalhos nacionais enfatizam que comunidades microbianas previamente adaptadas ao produto podem acelerar a taxa de degradação, diminuindo o efeito residual e a persistência da molécula em solos sob longo histórico de manejo químico (Santos et al., 2013).

Quando a taxa de dissipação no perfil edáfico é reduzida, a persistência prolongada do herbicida está diretamente relacionada ao risco de *carryover*, caracterizado pelo efeito residual prejudicial sobre culturas sucessoras sensíveis implantadas na área (Castro et al., 1983).

2.3. Influência da Textura e Matéria Orgânica

A eficácia biológica e a mobilidade do metribuzin estão diretamente associadas aos atributos edáficos. Características do solo como a textura (teor de argila), o teor de matéria orgânica, o pH e a capacidade de troca catiônica (CTC) influenciam diretamente os fenômenos de

retenção e movimentação da molécula, determinando a quantidade de herbicida que restará disponível na solução do solo para absorção pelas plantas (Lima, 2021).

A sorção de herbicidas em solos tropicais é um tema amplamente estudado no Brasil, especialmente em solos altamente intemperizados e com baixa CTC, como os latossolos predominantes no bioma Cerrado. Em geral, solos com maior teor de matéria orgânica ou textura mais argilosa apresentam elevada capacidade de retenção e adsorção do metribuzin, reduzindo sua disponibilidade imediata na solução do solo, o que atenua sua fitotoxicidade inicial e mitiga o potencial de lixiviação (Rodrigues & Almeida, 2011). Estudos brasileiros reforçam que a matéria orgânica e o carbono orgânico desempenham papel fundamental na adsorção do metribuzin e de outros herbicidas hidrossolúveis (Silva et al., 2007).

Em contrapartida, em solos de textura arenosa e de baixa CTC, o metribuzin exibe menor adsorção e maior mobilidade. Essa fraca retenção eleva a concentração do produto na solução edáfica, potencializando a ação herbicida imediata, mas aumentando drasticamente os riscos de lixiviação ao longo do perfil do solo e de injúrias por *carryover* a plantas sensíveis (Castro et al., 1983; Lima, 2021).

2.4. Bioindicadores

Para avaliar com precisão a persistência, o efeito residual e a atividade biológica de herbicidas no solo sob diferentes condições edáficas, a condução de bioensaios com plantas-teste — como o pepino e a aveia — após a aplicação em pré-emergência constitui uma ferramenta prática de alta relevância (Lima, 2021). Estudos conduzidos em solos cultivados com soja evidenciam o dinamismo desses ensaios, demonstrando, por exemplo, que quatro semanas após a aplicação o metribuzin pode deixar de apresentar bioatividade residual na camada superficial de 0–10 cm, indicando rápida dissipação dependendo das condições do meio (Lima, 2021).

Nesse contexto, pesquisas que avaliam a resposta de plantas sensíveis em diferentes solos tornam-se essenciais para compreender a complexa interação solo–herbicida–planta. O emprego do pepino (*Cucumis sativus*) como planta bioindicadora destaca-se como uma estratégia amplamente consolidada na pesquisa científica voltada ao comportamento ambiental de herbicidas, apresentando sensibilidade necessária para detectar a presença do produto mesmo em baixas concentrações e viabilizando a comparação confiável do efeito residual entre solos de naturezas físico-químicas distintas

2.5. Curvas Dose-Resposta

O estudo detalhado da resposta de bioindicadores vegetais à aplicação de diferentes dosagens permite a construção de curvas dose-resposta. Na ciência das plantas daninhas, essa metodologia é considerada o padrão analítico ideal para avaliar o comportamento de moléculas sob variações edáficas regionais, pois possibilita estimar parâmetros matemáticos robustos e precisos.

Investigar a curva dose-resposta do metribuzin em diferentes solos do estado de Goiás é fundamental para quantificar como a variabilidade física e química local afeta a disponibilidade real do herbicida, sua eficiência técnica no controle da comunidade infestante e seu potencial de causar impactos agronômicos ou ambientais. Os dados gerados por meio dessas curvas dão suporte à determinação de doses eficazes e críticas, permitindo ajustar o manejo para condições reais de campo, reduzir os riscos de *carryover* e otimizar as recomendações técnicas (CASTRO et al., 1983).

3. METODOLOGIA

3.1. Localização e características do ambiente experimental

O experimento foi conduzido no Parque Científico e Tecnológico Samambaia da Universidade Federal de Goiás (PTS/UFG), em Goiânia – GO, em uma casa de vegetação pertencente à empresa Herbil. O ambiente apresentou temperatura e luminosidade controladas, permitindo adequado desenvolvimento das plantas bioindicadoras.

A aplicação do herbicida foi realizada no galpão de máquinas da Escola de Agronomia (EA/UFG), utilizando estrutura protegida para garantir precisão, homogeneidade e segurança durante o procedimento.

3.2. Delineamento experimental e preparo dos materiais

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), arranjado em esquema fatorial 5 x 5, correspondendo a cinco tipos de solo e cinco doses do herbicida, com quatro repetições, perfazendo 100 unidades experimentais.

As unidades experimentais consistiram em copos plásticos com capacidade de **300 mL**, sem perfurações na base, com o objetivo de evitar a drenagem e a consequente lixiviação da molécula, assegurando a permanência do herbicida residual no sistema. Cada copo foi preenchido com solo previamente seco ao ar e peneirado em malha de 2 mm.

3.3. Caracterização e preparo dos solos

Foram utilizados cinco solos provenientes de áreas de produção agrícola pertencentes a uma usina, chamada Usina Goianésia, localizada no município de Goianésia - GO.

- RQo: Neossolo Quartzarênicos Órticos
- LVw: Latossolo Vermelho Ácrico
- LVdf: Latossolo Vermelho Distroférico
- CXbd: Cambissolo Háplicos TB Distróficos
- LVd: Latossolo Vermelho Distrófico

Todos pertenciam a ambientes agrícolas ou naturais representativos do Cerrado, predominando latossolos de textura variável (arenosa a argilosa).

Os solos foram coletados na camada de 0–20cm, secos ao ar por 48 horas, destorroados manualmente e peneirados. Após peneiramento, cada solo foi acondicionado em recipientes

individuais e submetido à umidificação padronizada, ajustada próximo à capacidade de campo, de modo a garantir condições homogêneas entre os vasos no momento da aplicação. As características físico-químicas dos solos estudados estão detalhadas na Tabela 1

Caracterização físico-química dos solos						
Tipo de Solo	pH CaCl ²	M.O. (g/dm ³)	CTC (mmolc / dm ³)	Argila (g/kg)	Silte (g/kg)	Areia (g/kg)
RQo	5,00	14,00	3,25	110	50	840
LVw	4,50	23,00	3,87	400	100	500
LVdf	6,10	28,00	10,77	570	130	300
CXbd	5,40	21,00	5,88	570	130	300
LVd	5,60	22,00	7,13	440	110	450

Tabela 1: Caracterização físico-química dos solos.

Nota: M.O. = Matéria Orgânica; CTC = Capacidade de Troca Catiônica;

Fonte: Análise de solo - Herbil (2023)

3.4. Plantio da espécie bioindicadora

A espécie utilizada como planta bioindicadora foi o pepino caipira (*Cucumis sativus* L.), devido à sua elevada sensibilidade a herbicidas fotossintéticos e à capacidade de responder a variações da biodisponibilidade no solo.

Em cada unidade experimental foram semeadas quatro sementes, a aproximadamente 1 cm de profundidade. Após a emergência, foi realizado desbaste, mantendo-se duas plantas vigorosas por vaso.

3.5. Tratamentos e aplicação do herbicida

Os tratamentos consistiram em cinco doses do herbicida Metribuzin Tide 480 SC (registro MAPA nº 9415), calculadas com base na dose recomendada de 1,0 L ha⁻¹ para a cultura da soja. Seguiram-se as proporções:

- 0x – testemunha, sem aplicação;
- 0,25x – equivalente a 0,25 L ha⁻¹;
- 0,50x – equivalente a 0,50 L ha⁻¹;
- 1,00x – dose recomendada (1,0 L ha⁻¹);
- 2,00x – equivalente a 2,0 L ha⁻¹.

As soluções correspondentes a cada uma das quatro dosagens com herbicida foram preparadas e individualizadas em quatro reservatórios plásticos (tipo PET) com capacidade de 2 L por tratamento.

A aplicação ocorreu imediatamente após a semeadura. Utilizou-se um pulverizador costal pressurizado por cilindro de CO₂, mantendo-se a pressão constante para assegurar a homogeneidade da calda. A calibração do equipamento foi realizada previamente por meio do método volumétrico direto, utilizando-se um béquer graduado de vidro posicionado sob a ponta de pulverização; o acionamento do gatilho foi sincronizado simultaneamente com o cronômetro para determinar o tempo exato necessário para a coleta rigorosa de 50 mL de calda.

Para a execução da pulverização, os vasos foram alinhados em linha reta ao longo de uma faixa experimental total de 5 metros de comprimento. Para eliminar os erros decorrentes da oscilação de velocidade na saída e na parada do operador, instituiu-se uma zona de aceleração de 1 metro no início e uma zona de desaceleração de 1 metro no fim da pista, estabelecendo uma área útil central de 3 metros de comprimento onde as unidades experimentais foram efetivamente posicionadas. O deslocamento do operador foi iniciado antes da área útil; no momento exato em que a barra de pulverização cruzou a marcação inicial de 1 metro, o gatilho foi acionado e o cronômetro foi iniciado simultaneamente. A aplicação e a cronometragem estenderam-se de forma constante ao longo dos 3 metros úteis, com tempo-alvo rigoroso de 5,79 segundos para o percurso, com tolerância operacional estrita de apenas $\pm 0,10$ segundo. Ao cruzar a marcação final de 4 metros, a pulverização foi imediatamente interrompida.

O equipamento operou com uma barra dotada de pontas de pulverização de jato plano (tipo leque), regulada a uma altura constante de 0,50 m em relação à superfície dos vasos, distribuindo um volume de calda equivalente a 200 L ha⁻¹. Esse controle milimétrico, associando a vazão aferida no béquer ao passo útil cronometrado, garantiu a eliminação do efeito de borda e a deposição exata da dose nominal planejada sobre a superfície exposta de cada solo.

3.6. Condução do experimento e manejo de irrigação

Após a aplicação, os vasos foram imediatamente transferidos para a casa de vegetação. O manejo hídrico foi rigorosamente controlado para viabilizar a ativação do herbicida residual sem promover excessos que induzissem o estresse anóxico, visto que os recipientes não possuíam furos de drenagem.

O fornecimento basal de água foi realizado por meio de um sistema automatizado de microaspersão, programado para efetuar regas em horários fixos estabelecidos. Adicionalmente, no período vespertino — associado a maiores temperaturas ambientais —, realizou-se o monitoramento visual diário da umidade de cada vaso. Havendo necessidade, foi efetuada a complementação hídrica manual dirigida por recipiente, adicionando-se o volume de água necessário para restabelecer a capacidade de campo (CC) original de cada uma das cinco classes de solo.

3.7. Avaliações e coleta de dados

As avaliações visuais de fitointoxicação foram realizadas a cada sete dias até 28 dias após a aplicação (DAA), totalizando quatro avaliações. Utilizou-se escala percentual de 0 a 100%:

- 0% – plantas sem sintomas;
- 100% – morte total da planta

Ao final do período experimental (28 DAA), as plantas de cada unidade experimental foram cortadas rente ao nível do colo com o auxílio de lâminas de corte. A parte aérea coletada foi imediatamente acondicionada em sacos de papel Kraft devidamente identificados. Esse material vegetal foi transferido para uma estufa de circulação forçada de ar, regulada e mantida à temperatura constante de 70 °C, pelo período de 72 horas (3 dias), até atingir massa constante.

Após a secagem, a fitomassa seca de cada uma das quatro repetições (vasos) de cada tratamento foi pesada individualmente em balança analítica de precisão (com resolução de 0,001 g). Para a análise estatística e posterior confecção dos gráficos, os valores de massa seca obtidos nos quatro vasos de cada tratamento foram somados e divididos por quatro, obtendo-se a média por repetição.

3.8. Análise estatística

Embora modelos de regressão (linhas de tendência) tenham sido testados, os dados não apresentaram ajuste estatístico satisfatório. Isso ocorreu devido ao comportamento biológico observado no experimento: o metribuzin causou injúria severa e mortalidade abrupta do bioindicador logo na menor dose testada (0,25x) na quase totalidade dos solos. Esse efeito do tipo "tudo ou nada" (plantas vivas na testemunha e mortas nas demais doses) impediu o cálculo de

curvas, tornando o uso de modelos lineares ou sigmoidais inadequado para descrever a realidade do ensaio.

Dessa forma, adotou-se a estatística descritiva como ferramenta principal de interpretação. Os resultados foram representados por meio de gráficos de barras, utilizando-se as médias dos tratamentos e as barras de erro-padrão para ilustrar e comparar visualmente o efeito do herbicida residual em cada solo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Resultados gerais obtidos no experimento

A resposta do pepino (*Cucumis sativus* L.) ao metribuzin variou conforme as características físico-químicas de cada solo. Matrizes com menor capacidade de adsorção propiciaram fitointoxicação severa e mortalidade precoce das plantas. Em contrapartida, solos com maiores atributos coloidais exerceram efeito protetivo superior, mitigando a biodisponibilidade imediata do herbicida e permitindo a sobrevivência do bioindicador nas menores dosagens.

Devido à ocorrência de mortalidade abrupta e à ausência de um gradiente biológico intermediário na maior parte das doses, os dados não atenderam aos pressupostos para a aplicação de testes convencionais como ANOVA ou Tukey. Por essa razão, a interpretação baseou-se na estatística descritiva, utilizando o contraste direto das médias amostrais para evidenciar o impacto dos tratamentos e as barras de erro-padrão para ilustrar a variabilidade das repetições.

Essa dinâmica é respaldada pela literatura. Blanco et al. (1983) confirmam que a atividade do metribuzin é controlada pela textura e matéria orgânica, o que justifica o rápido colapso em solos arenosos, onde a molécula fica livre na solução. Além disso, Henriksen et al. (2004) e Lima (2021) explicam que o forte poder tampão e a elevada capacidade de troca catiônica (CTC) de solos mais argilosos promovem a retenção temporária do herbicida pré-emergente. Esse mecanismo reduz a concentração disponível para a absorção radicular, retardando e atenuando os sintomas iniciais de injúria.

4.2. Desenvolvimento inicial e potencial produtivo basal (Testemunha)

Para compreender o comportamento do metribuzin nas diferentes condições edáficas, estabeleceu-se primeiramente o potencial de desenvolvimento da planta bioindicadora na ausência do produto químico (dose 0). Para garantir a representatividade desses dados e mitigar variações individuais, os resultados apresentados correspondem à média aritmética da biomassa seca obtida nos quatro vasos (repetições) utilizados para cada tipo de solo. Este procedimento é crucial, pois permite diferenciar o efeito deletério do herbicida da variabilidade natural de crescimento imposta pela fertilidade e características físicas de cada solo estudado.

Conforme apresentado na **Figura 1**, observou-se variação na massa seca das plantas entre os solos avaliados. O solo LVdf apresentou o maior acúmulo de biomassa média ($0,3749 \text{ g planta}^{-1}$), sugerindo condições mais favoráveis ao desenvolvimento inicial do pepino em comparação aos

demais ambientes. Em contrapartida, solos como o LVw e o RQo apresentaram um desenvolvimento inferior, com médias de 0,2026 e 0,2217 g planta⁻¹, respectivamente. Tais discrepâncias reforçam a importância de considerar a variabilidade edáfica intrínseca detalhada na Tabela 1 ao interpretar os efeitos subsequentes do herbicida.

A determinação desses valores basais da testemunha foi indispensável para avaliar o impacto do herbicida nos tópicos seguintes. À exceção do solo LVdf na dosagem de 0,25x — onde a sobrevivência de duas repetições permitiu o acúmulo parcial de MSPA —, todas as demais matrizes edáficas e doses sofreram uma redução de 100% na biomassa seca final devido à mortalidade precoce do bioindicador. Esse colapso produtivo estabelece uma correlação direta e absoluta entre o incremento das notas visuais de fitotoxicidade e o decréscimo da biomassa sob a ação do metribuzin.

Massa seca das testemunhas

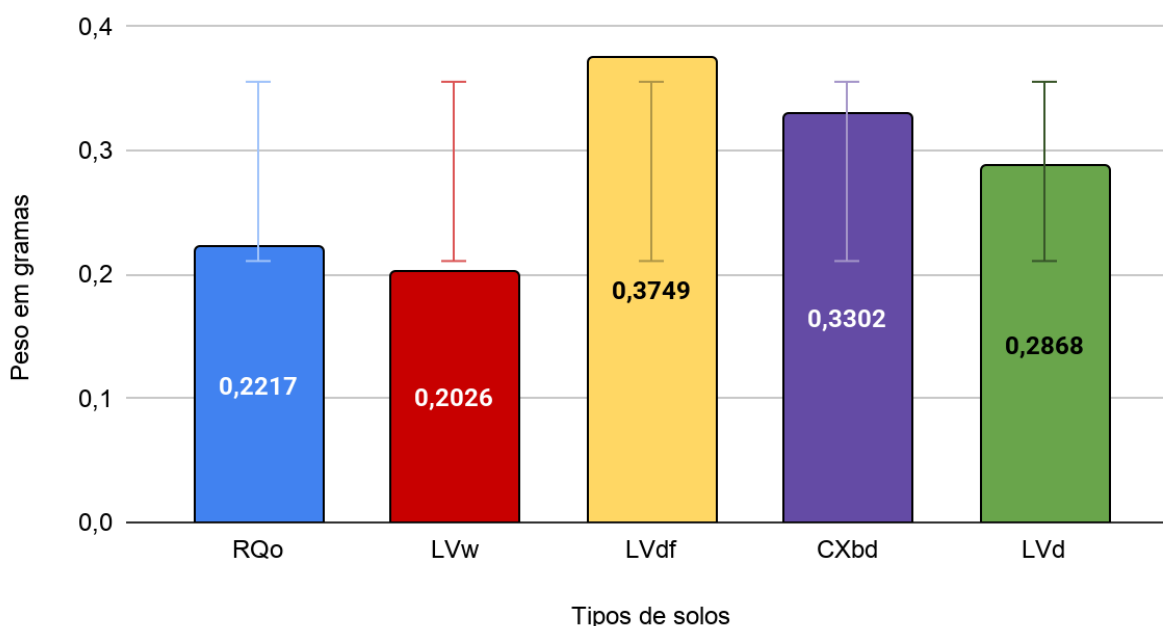


Figura 1: Biomassa seca da parte aérea (g planta⁻¹) de pepino (*Cucumis sativus*) cultivado em diferentes solos do estado de Goiás, na ausência de aplicação de herbicida (Testemunha – Dose 0). As barras representam a média de quatro repetições

4.3. Resposta do solo RQo

No solo RQo (Neossolo Quartzarênico Órtico), observou-se a maior sensibilidade das plantas de pepino à aplicação do metribuzin entre todos os solos avaliados, caracterizando-o como o ambiente de menor proteção coloidal do experimento. Conforme apresentado na Figura 2, os sintomas de fitotoxicidade atingiram níveis severos (próximos a 100%) já na menor dose testada (0,25x), com a morte total das plantas observada precocemente, estabelecendo-se um quadro de letalidade irreversível logo aos 14 DAA.

Gráfico de notas do solo RQo

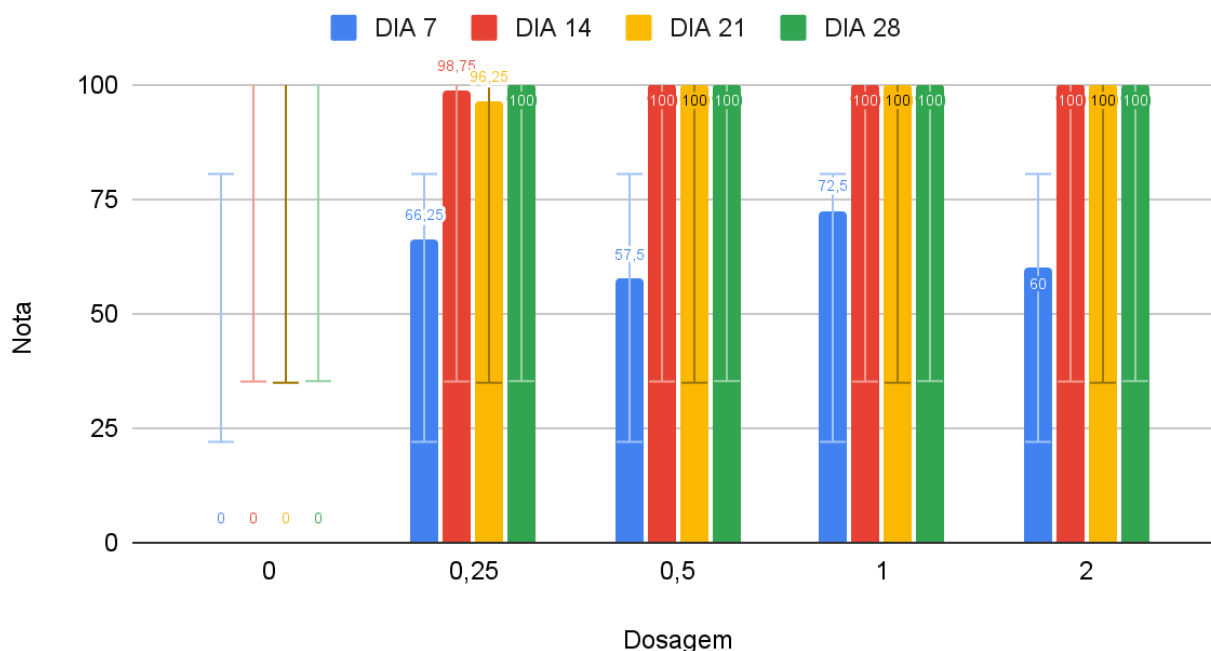


Figura 2: Fitotoxicidade (%) do herbicida metribuzin em função da dose e do tempo de avaliação (7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação) no solo RQo, expressa por média \pm desvio padrão.

Essa alta suscetibilidade não é uma característica intrínseca do bioindicador, mas sim um reflexo da biodisponibilidade imediata do herbicida, ditada pelas características descritas na Tabela 1. O solo RQo apresenta o menor teor de argila (110 g/kg) e a menor CTC (3,25 mmolc/dm³) do estudo. Em solos com essa configuração, há uma carência de sítios de adsorção (superfícies de contato), o que impede que a molécula de metribuzin seja retida na fase sólida.

Considerando que o metribuzin possui alta solubilidade em água e atua como um inibidor do fotossistema II, a ausência de retenção coloidal faz com que o fluxo de massa transporte o herbicida diretamente para o sistema radicular. O baixo teor de matéria orgânica ($14,00 \text{ g/dm}^3$) atua como um agravante, pois a matéria orgânica seria o principal componente capaz de exercer sorção sobre essa molécula em solos arenosos.

Diferente do observado nos solos argilosos como o LVdf, onde a liberação do herbicida é gradual, no RQo ocorre um efeito de "choque". A saturação dos mecanismos de detoxificação da planta é instantânea, resultando na rápida clorose seguida de necrose que progrediu para 100% de injúria em todas as doses. Esse resultado confirma que a seletividade de um herbicida não é um valor fixo, mas uma variável dependente do poder tampão do solo. Em Neossolos Quartzarênicos, a ausência de adsorção reduz a margem de segurança técnica, tornando o bioindicador extremamente vulnerável mesmo sob subdosagens.

4.4. Resposta do solo LVdf

O solo LVdf (Latossolo Vermelho Distroférico) apresentou o comportamento mais contrastante em relação ao solo RQo, demonstrando uma expressiva capacidade de proteção ao bioindicador frente à aplicação do herbicida. Esta tendência é verificada tanto na evolução temporal dos sintomas quanto na análise da sobrevivência das plantas em diferentes dosagens.

Conforme demonstram os dados de fitotoxicidade (Figura 3), o avanço das injúrias no LVdf ocorreu de forma gradual. O destaque principal reside na dose de 0,25x, na qual o pepino apresentou sobrevivência até o final do período avaliado (28 DAA), com notas de fitotoxicidade que não ultrapassaram a marca de 50%. Este resultado é único entre todos os solos submetidos ao herbicida, uma vez que, nas demais classes de solo, a dose de 0,25x foi suficiente para causar a morte total das plantas ou danos severos precocemente.

Gráfico de notas do solo LVdf

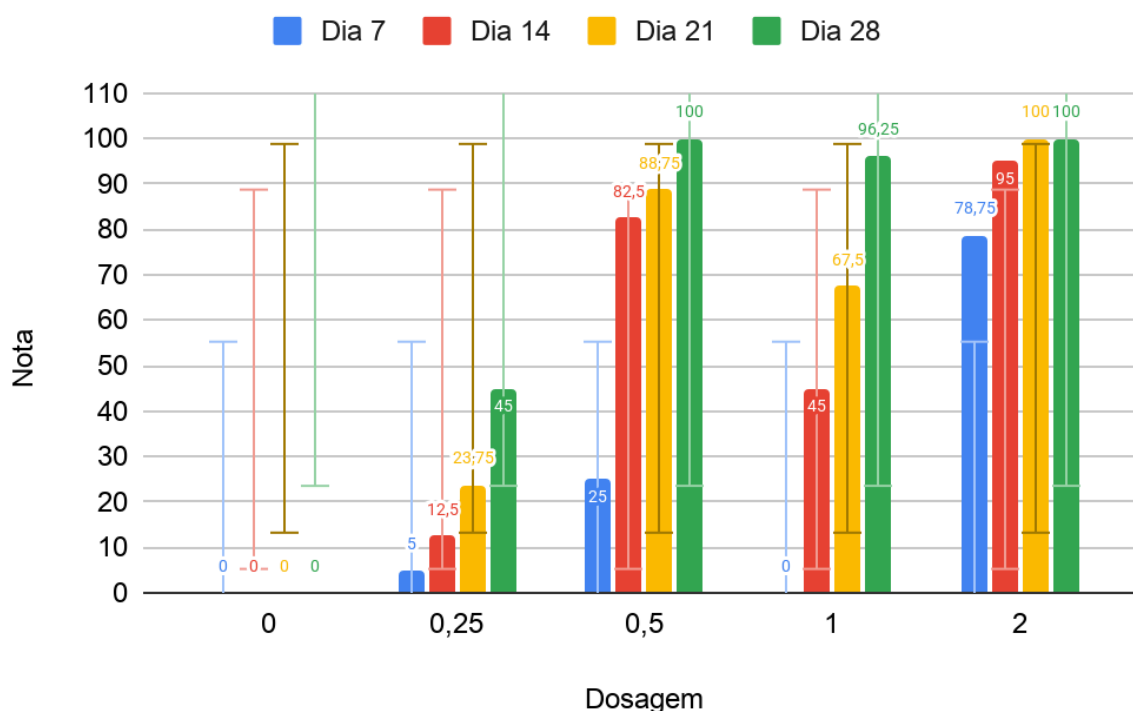


Figura 3: Fitotoxicidade (%) do herbicida metribuzin em função da dose e do tempo de avaliação (7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação) no solo LVdf, expressa por média \pm desvio padrão.

Os resultados observados no solo LVdf corroboram a elevada capacidade de retenção oferecida por este ambiente edáfico. Notou-se uma progressão de injúrias significativamente mais lenta em resposta ao incremento das doses, demonstrando uma maior resiliência biológica do sistema quando comparado aos demais solos do experimento. O comportamento do bioindicador, especialmente nas dosagens iniciais, sugere a existência de um limiar de adsorção. Nesse cenário, concentrações baixas do herbicida são quase totalmente retidas pelos coloides antes de atingirem o sistema radicular em níveis tóxicos. Essa resposta menos acentuada ao incremento das doses evidencia que o LVdf demanda concentrações substancialmente maiores de metribuzin para que danos letais sejam atingidos, funcionando como um "amortecedor" químico.

Essa "segurança" biológica e a maior seletividade observada no LVdf são justificadas pelos seus robustos atributos físico-químicos. Este solo possui o maior teor de argila (570 g/kg), a maior CTC (10,77 mmolc/dm³) e o maior teor de matéria orgânica (28,00 g/dm³) do experimento. De

acordo com a literatura, a combinação desses fatores favorece a adsorção das moléculas de metribuzin às partículas sólidas, reduzindo a concentração do herbicida livre na solução.

Dessa forma, a biodisponibilidade para absorção radicular é atenuada, permitindo que a planta sobreviva por meio de uma exposição gradual e reduzida. Isso confirma que a textura argilosa, aliada ao alto poder tampão deste Latossolo, é determinante na mitigação dos efeitos tóxicos do herbicida.

4.5. Resposta do solo CXbd

O solo CXbd (Cambissolo Háplico) apresentou um padrão de fitotoxicidade intermediário, situando-se entre a extrema vulnerabilidade do solo arenoso (RQo) e a resiliência observada no latossolo argiloso (LVdf). Entretanto, apesar de possuir uma textura média, as propriedades físico-químicas deste solo não foram suficientes para conter a letalidade do herbicida nas doses testadas. De acordo com o gráfico de notas (Figura 4), as injúrias aos 7 DAA já se mostravam superiores a 30% na dose de 0,25x, evoluindo rapidamente para a morte total das plantas (100%) aos 21 DAA.

Gráfico de notas do solo CXbd

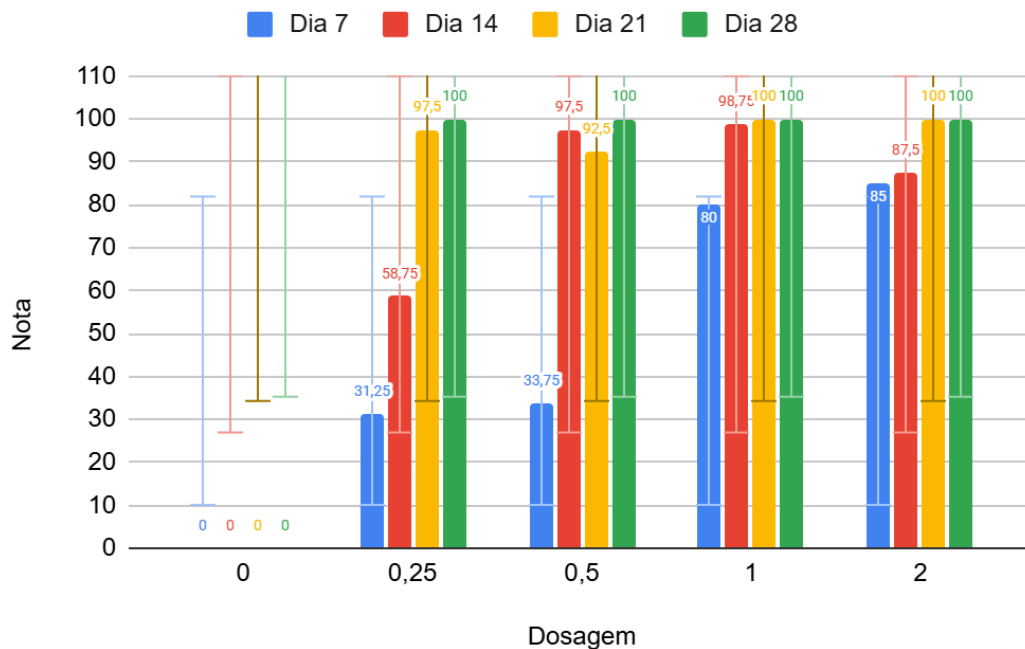


Figura 4: Fitotoxicidade (%) do herbicida metribuzin em função da dose e do tempo de avaliação (7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação) no solo CXbd, expressa por média \pm desvio padrão.

Os resultados observados no solo CXbd reforçam a maior agressividade do metribuzin neste ambiente, com injúrias que se manifestam de forma acentuada e precoce. Diferente do observado no LVdf, a fitotoxicidade no CXbd ocorre de maneira imediata mesmo nas menores concentrações testadas. Isso evidencia um limiar de retenção inicial significativamente menor, indicando que este solo satura sua capacidade de proteção muito antes do Latossolo de mesma textura. A incapacidade do solo CXbd em modular a absorção do herbicida pelo bioindicador na dose de 0,25x reside na disparidade da qualidade de seus atributos coloidais. É importante destacar que, embora o CXbd possua o mesmo teor de argila que o solo LVdf (570 g/kg), sua capacidade de proteção foi drasticamente inferior.

Essa diferença fundamental é explicada pela Capacidade de Troca Catiônica (CTC), que no CXbd é de apenas 5,88 mmolc/dm³ — um valor quase 45% menor que os 10,77 mmolc/dm³ observados no LVdf. Essa inferioridade química implica em uma menor densidade de cargas e menor reatividade da fração mineral, resultando em uma saturação precoce dos sítios de adsorção.

Além disso, o teor de matéria orgânica no CXbd (21,00 g/dm³) é inferior ao do LVdf (28,00 g/dm³), o que reduz o poder tampão do solo frente a moléculas de alta solubilidade como o metribuzin. Dessa forma, a "força de atração" exercida pelo complexo sortivo do CXbd não foi suficiente para reter a molécula contra a afinidade da fase líquida. O resultado foi uma maior biodisponibilidade do herbicida na solução do solo, o que explica por que este ambiente atingiu níveis letais de dano de forma precoce, sendo incapaz de controlar a absorção radicular pelo pepino.

4.6. Resposta do solo LVd

O solo LVd (Latosolo Vermelho Distrófico) apresentou um comportamento de fitotoxicidade severa e rápida, assemelhando-se ao padrão de alta biodisponibilidade observado no solo RQo. Diferente do seu par de mesma classe pedológica, o LVdf, o solo LVd não ofereceu proteção suficiente ao bioindicador, mesmo nas doses mais baixas. Conforme demonstrado no gráfico de notas (Figura 5), a dose de 0,25x já causou injúrias superiores a 40% aos 14 DAA, evoluindo para o colapso total das plantas (100%) aos 28 DAA. Nas doses superiores (0,5x a 2,0x), a fitotoxicidade máxima foi atingida ainda mais precocemente, com morte total observada entre 14 e 21 DAA.

Gráfico de notas do solo LVd

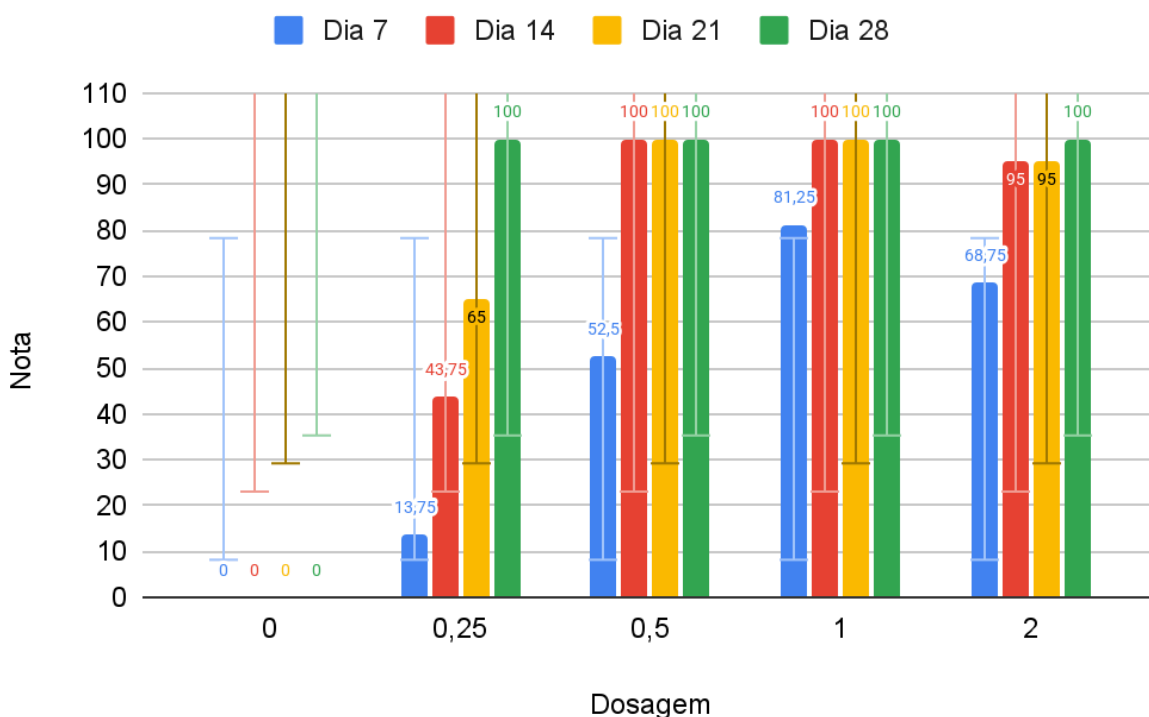


Figura 5: Fitotoxicidade (%) do herbicida metribuzin em função da dose e do tempo de avaliação (7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação) no solo LVd, expressa por média \pm desvio padrão.

Diferente dos solos LVdf e CXbd, para o solo LVd não foi realizado o ajuste do modelo de regressão linear. Esta decisão técnica fundamenta-se no fato de o coeficiente de determinação obtido ter sido inferior ao limite de confiabilidade estabelecido ($R^2 \leq 0,60$). A rápida transição das plantas para o estado de morte total gerou uma distribuição de dados que o modelo linear simples não foi capaz de descrever com precisão estatística, optando-se por manter apenas a análise das médias para garantir a fidedignidade da discussão. A baixa capacidade de retenção do LVd, comparada ao LVdf, é explicada pela disparidade nos atributos que compõem o poder tampão do solo. O LVd possui 440 g/kg de argila e uma CTC de 7,13 mmolc/dm³, valores significativamente menores que os do LVdf (570 g/kg e 10,77 de CTC). Essa redução na fração coloidal implica em uma menor densidade de sítios de adsorção disponíveis para o metribuzin.

Além disso, a ausência do caráter "férico" (comum no LVdf) sugere uma mineralogia menos complexa, o que deixa o herbicida livre na solução do solo. Sem essa barreira química, o

metribuzin atua com agressividade, sendo rapidamente absorvido pelas raízes do pepino e inibindo o fluxo de elétrons no fotossistema II, o que culmina no colapso precoce das plantas mesmo em dosagens reduzidas.

4.7. Resposta do solo LVw

O solo LVw (Latosolo Vermelho Ácrico) revelou um comportamento de alta suscetibilidade, surpreendendo por não oferecer a proteção esperada para uma classe de solo tipicamente argilosa. Diferente do solo LVdf, que atuou como um filtro eficiente, o LVw apresentou um padrão de resposta extremamente agressivo, aproximando-se da vulnerabilidade observada no solo arenoso (RQo). Conforme demonstrado no gráfico de notas (Figura 8), a fitotoxicidade atingiu níveis críticos de 93,75% já aos 14 DAA na menor dose testada (0,25x), evoluindo para a letalidade total (100%) de todas as plantas a partir dos 21 DAA.

Gráfico de notas do solo LVw

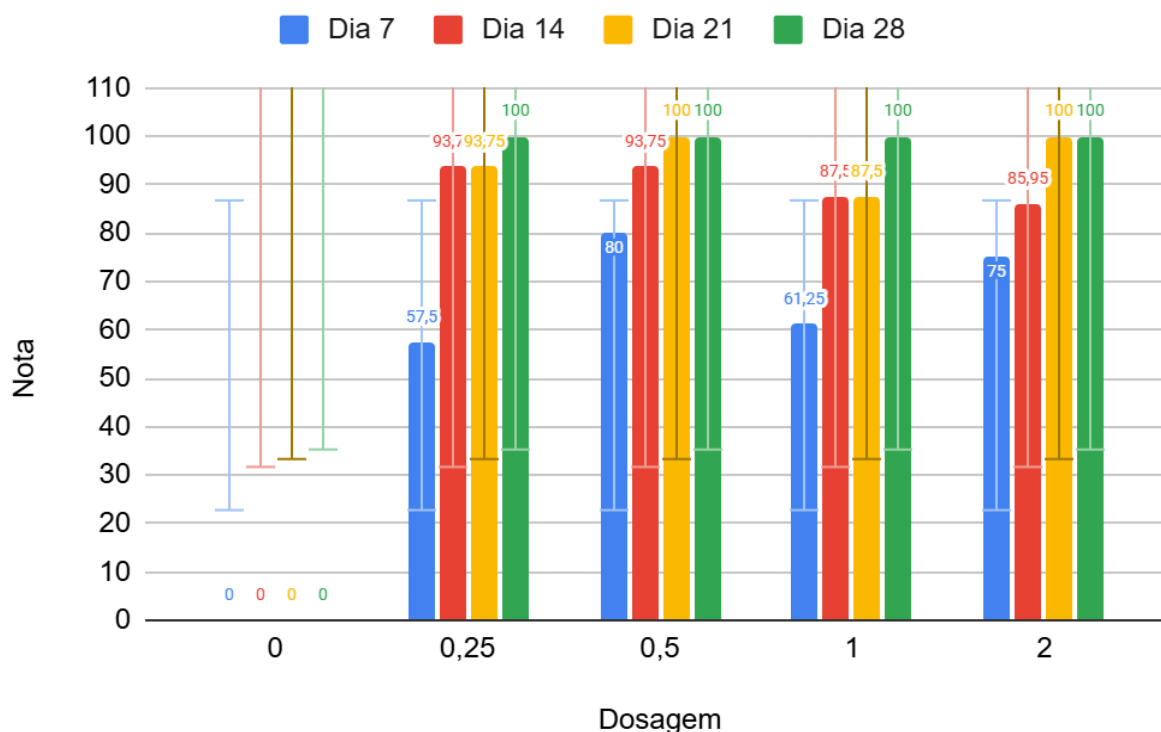


Figura 6: Fitotoxicidade (%) do herbicida metribuzin em função da dose e do tempo de avaliação (7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação) no solo LVw, expressa por média \pm desvio padrão.

Esta resposta drástica é explicada pela fragilidade dos atributos físico-químicos deste solo, detalhados na Tabela 1. Embora o LVw possua um teor de argila considerável (400 g/kg), sua CTC de apenas 3,87 mmolc/dm³ é o fator determinante para a baixa seletividade. Este valor de CTC é estatisticamente muito próximo aos 3,25 mmolc/dm³ do solo arenoso (RQo), evidenciando que, no LVw, existe uma severa escassez de sítios de adsorção. Na prática, a fração mineral deste solo, apesar de volumosa, possui baixa densidade de cargas e reatividade para reter a molécula de metribuzin.

Somado a isso, o pH mais ácido (4,50) e o teor de matéria orgânica (23,00 g/dm³) inferior ao do LVdf contribuíram para o baixo poder tampão. Sem "pontos de ancoragem" suficientes no complexo sortivo, o herbicida permaneceu em sua maior parte na fase líquida (alta biodisponibilidade), resultando em uma absorção radicular massiva e imediata. O colapso do sistema fotossintético do pepino ocorreu de forma abrupta, confirmando que, para o metribuzin, a qualidade química dos coloides (CTC) sobrepõe-se à quantidade de argila na definição da segurança biológica da aplicação.

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que:

- A dinâmica e o efeito residual do metribuzin são regulados diretamente pelos atributos físico-químicos de cada classe de solo.
- Os teores de argila, matéria orgânica e a CTC são os principais determinantes da fitotoxicidade; solos arenosos favorecem a máxima biodisponibilidade da molécula e a letalidade precoce, enquanto solos argilo-oxídicos atenuam os danos imediatos por sua maior capacidade de adsorção.
- Recomendações padronizadas de metribuzin não são adequadas para as diferentes classes de solos do Cerrado, visto que a seletividade do produto depende estritamente do ambiente edáfico.
- O conhecimento gerado auxilia na definição de doses mais seguras e eficientes para os sistemas agrícolas do estado de Goiás, ajustando o manejo à textura e à mineralogia para evitar injúrias em culturas sensíveis e riscos de lixiviação.
- Como perspectivas futuras, novos estudos devem avaliar a persistência do metribuzin sob condições de campo no Cerrado e sua interação com regimes de chuva e palhada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- NUNES, A. L.; LORENSET, J.; GUBIANI, J. E.; SANTOS, F. M. *et al.* A multy-year study reveals the importance of residual herbicides on weed control in glyphosate-resistant soybean. *Planta Daninha*, v. 36, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582018360100039>.
- ROCHA, P. R. R.; FARIA, A. T.; BORGES, L. G. F. C. *et al.* Sorção e desorção do diuron em quatro latossolos brasileiros. *Planta Daninha*, v. 31, n. 1, p. 223-231, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582013000100025>.
- BLANCO, H. G.; NOVO, M. C. S. S.; SANTOS, C. A. L. *et al.* Persistence of metribuzin herbicide in soils under soybean crop. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 18, p. 154-160, 1983. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab1983.v18.15427>.
- HENRIKSEN, T.; SVENSMARK, B.; JUHLER, R. K. Degradation and sorption of metribuzin and primary metabolites in a sandy soil. *Journal of Environmental Quality*, v. 33, n. 2, p. 619-627, 2004. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2004.6190>.
- REINERT, C. S.; PRADO, A. B. C. A.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Curvas de dose-resposta comparativas entre os biótipos resistente e suscetível de capim-amargoso (*Digitaria insularis*) ao herbicida glyphosate. *Revista Brasileira de Herbicidas*, v. 12, n. 3, p. 223-230, 2013. DOI: <https://doi.org/10.7824/rbh.v12i3.223>.
- CARVALHO, F. T.; CASTRO, R. M.; OTSUBO, R. I. *et al.* Controle de dez espécies daninhas em cana-de-açúcar com o herbicida mesotrione em mistura com ametryn e metribuzin. *Planta Daninha*, v. 28, n. 3, p. 585-590, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582010000300015>.
- CORREIA, N. M.; CARVALHO, A. D. F. Selectivity of the herbicide metribuzin for pre- and post-emergence applications in potato cultivation. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 39, n. 3, p. 963-970, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2018v39n3p963>.
- DOWLER, C. C. A cucumber bioassay test for the soil residues of certain herbicides. *Weed Science*, v. 17, n. 3, p. 309-310, 1969. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0043174500054102>.
- SEEFELDT, S. S.; JENSEN, J. E.; FUERST, E. P. Log-logistic analysis of herbicide dose-response relationships. *Weed Technology*, v. 9, n. 2, p. 218-227, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0890037X00023253>.
- LIMA, A. da C. *Mapeamento da variabilidade espacial da sorção-desorção e eficiência agrônômica do indaziflam e metribuzin em solos para o manejo de precisão de plantas daninhas*. 2021. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2021.
- REBAI, H.; SHOLKAMY, E. N.; ABDELHAMID, M. A. A. *et al.* Soil actinobacteria exhibit metabolic capabilities for degrading the toxic and persistent herbicide metribuzin. *Toxics*, v. 12, n. 10, p. 709, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics12100709>.