



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR EM ENGENHARIA AGRONÔMICA**

JENNIFER CURVINA ALMEIDA

**RESPOSTA ECOTOXICOLÓGICA NA GERMINAÇÃO E CRESCIMENTO INICIAL
DO MILHO E TOMATE EM SOLO DE FRUTICULTURA IRRIGADA**

Palmas
2025

JENNIFER CURVINA ALMEIDA

**RESPOSTA ECOTOXICOLÓGICA NA GERMINAÇÃO E CRESCIMENTO INICIAL
DO MILHO E TOMATE EM SOLO DE FRUTICULTURA IRRIGADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso Bacharelado em Agronomia
da Unidade Palmas, do Instituto Federal do
Tocantins, como exigência à obtenção do título de
Bacharel(a) em Engenharia Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. Thomas Vieira Nunes

Palmas
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

A447r Almeida, Jennifer Curvina
RESPOSTA ECOTOXICOLÓGICA NA GERMINAÇÃO E
CRESCIMENTO INICIAL DO MILHO E TOMATE EM SOLO DE
FRUTICULTURA IRRIGADA / Jennifer Curvina Almeida. – Palmas,
TO, 2025.
66 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) –
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins,
Campus Palmas, Palmas, TO, 2025.

Orientador: Dr. Thomas Vieira Nunes

1. Ecotoxicologia. 2. Qualidade do solo. 3. Bioensaios. I. Vieira
Nunes, Thomas. II. Título.

CDD 630

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS - TO
COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÔNOMICA

JENNIFER CURVINA ALMEIDA

**RESPOSTA ECOTOXICOLÓGICA NA GERMINAÇÃO E CRESCIMENTO INICIAL DO MILHO E
TOMATE EM SOLO DE FRUTICULTURA IRRIGADA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso Superior Bacharelado em
Engenharia Agrônômica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins -
Campus Palmas - TO, como exigência à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Agrônômica.

Aprovado em: 06 de agosto de 2025

BANCA AVALIADORA

Prof. Dr. Thômas Vieira Nunes
IFTO - Campus Palmas - TO.

Prof. M.Sc. José Eustáquio Canguçu Leal
IFTO - Campus Palmas - TO.

Prof. Dr. Edvaldo Vieira Pacheco Sant'Ana
IFTO - Campus Palmas - TO.

Palmas - TO, 06 de agosto de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Thomas Vieira Nunes, Servidor**, em
06/08/2025, às 16:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art.
6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edvaldo Vieira Pacheco Santana, Coordenador**, em 06/08/2025, às 16:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jose Eustaquio Cangucu Leal, Servidor**, em 06/08/2025, às 16:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.iftto.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2854898** e o código CRC **ECCDDA37**.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS

Campus Palmas 310 Sul, Av. LO 5, s/n, esquina com a Avenida NS 10 - Plano Diretor Sul — CEP 77021-090 Palmas/TO - portal.iftto.edu.br — reitoria@iftto.edu.br

Referência: Processo nº 23236.015887/2025-39

SEI nº 2854898

Dedico este trabalho, com todo o meu amor e gratidão, à minha mãe, Iraildes Curvina Alves Almeida, exemplo de força, coragem e sabedoria. Sua dedicação incansável, seus conselhos e seu amor incondicional foram a base que sustentou cada passo da minha caminhada. Este TCC é também fruto do seu esforço, do seu sacrifício e da sua fé em mim. Obrigado por acreditar quando nem eu acreditava.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, coragem e sabedoria ao longo da minha jornada. Em meio a desafios, aprendizados e superações, sua presença foi e sempre será meu alicerce, do início ao fim de minha existência.

Aos meus familiares, minha eterna gratidão pelo apoio incondicional, pelos conselhos sábios e por estarem sempre ao meu lado, independentemente das circunstâncias. Foram fundamentais para que eu seguisse no caminho certo, com fé e determinação.

Aos meus colegas e amigos de turma, Ana Clara Alves Do Nascimento, Matthews Carvalho Leite, Maycon Mota Reis, Mateus dos Santos Silva, Naira Maria Ribeiro, Angeline de Fátima Branco, Pedro Henrique Fonseca da Silva e Rafael Coelho Avelino agradeço pelos momentos compartilhados, pelas palavras de incentivo e por todo o companheirismo durante minha trajetória acadêmica. Cada gesto de apoio fez diferença.

"Na simplicidade de uma semente
repousa o milagre da vida.

Ao agrônomo, cabe mais que plantar —
cabe entender o solo, ouvir o tempo e
respeitar o ciclo."

— Anônimo

RESUMO

A intensificação agrícola em áreas irrigadas pode provocar alterações na qualidade do solo, com possíveis efeitos ecotoxicológicos sobre organismos vegetais. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes solos do Perímetro de Irrigação São João, em Porto Nacional – TO, sobre o potencial germinativo e o desenvolvimento inicial de sementes de *Zea mays* L. (milho) e *Solanum lycopersicum* L. (tomate). A pesquisa foi experimental, com ensaios ecotoxicológicos conduzidos em laboratório, utilizando bioensaios padronizados pelo protocolo OECD 208/2006. Foram coletadas amostras de solo em áreas com cultivo agrícola e em pontos de vegetação nativa, sendo avaliadas as taxas de germinação, biomassa fresca e seca das plantas. A análise estatística incluiu ANOVA, teste de Tukey, Kruskal-Wallis e Dunnett. Os resultados demonstraram que solos agrícolas como C2 e C5 favoreceram o acúmulo de biomassa fresca, enquanto o solo REF 04 comprometeu a germinação e a biomassa seca, mesmo sendo de área não cultivada. Conclui-se que a qualidade do solo não depende apenas da fertilidade química, mas também de fatores físicos e da presença de contaminantes subletais. Os bioensaios com plantas mostraram-se sensíveis e eficazes para diagnóstico ambiental, reforçando a importância da abordagem integrada na gestão de áreas agrícolas.

Palavras-chave: Ecotoxicologia. Bioensaios. Qualidade do solo. Agricultura irrigada.

RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA

Agricultural intensification in irrigated areas can lead to changes in soil quality, with potential ecotoxicological effects on plant organisms. This study aimed to evaluate the effects of different soils from the São João Irrigation Perimeter, in Porto Nacional – TO, on the germination potential and early development of *Zea mays* L. (maize) and *Solanum lycopersicum* L. (tomato) seeds. The research was experimental, involving ecotoxicological bioassays conducted under controlled laboratory conditions, based on the OECD 208/2006 protocol. Soil samples were collected from agricultural areas and native vegetation reference sites, and the evaluated parameters included germination rate, fresh biomass, and dry biomass. Statistical analyses included ANOVA, Tukey's test, Kruskal-Wallis, and Dunnett's test. Results showed that agricultural soils such as C2 and C5 promoted fresh biomass accumulation, while the REF 04 soil negatively affected both germination and dry biomass, despite being a non-agricultural area. It is concluded that soil quality depends not only on chemical fertility, but also on physical attributes and the presence of sublethal contaminants. Plant-based bioassays proved to be sensitive and effective tools for environmental diagnostics, reinforcing the importance of an integrated approach in the management of agricultural areas.

Keywords: Ecotoxicology. Bioassays. Soil quality. Irrigated agriculture.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Área onde foram demarcados e coletados amostras de solos, corresponde: A. plantio de açaí; B. plantio de soja; C. plantio de mamão; D. plantio de mandioca; E, F. são os locais ditos de Referências; no Perímetro de Irrigação São João, Porto Nacional - TO/ Brasil.	28
Figura 2 - Sementes das variedades selecionadas para os experimentos de toxicidade do solo (<i>Solanum lycopersicum</i> e <i>Zea mays</i>), adquiridas em estabelecimentos comerciais de Palmas – TO.	29
Figura 3 - Preparo do material para montagem dos experimentos, recipientes descartáveis e amostras de solo; no Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas, Tocantins/ Brasil.	30
Figura 4 - preparo do material para os ensaios ecotoxicológicos com plantas, sendo: A. Termômetro digital, B. recipientes descartáveis identificados, C. prateleiras energizadas, ar-condicionado, no Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas, Tocantins/ Brasil.	30
Figura 5 - Solo controle para os ensaios ecotoxicológicos com plantas, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas.	31
Figura 6 - Etapa de semeadura das plantas A. e B. <i>Solanum lycopersicum</i> e <i>Zea mays</i> , C. Preparo dos ensaios ecotoxicológicos, no Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas, Tocantins/ Brasil.	31
Figura 7 - Réplicas das amostras do Controle-teste, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com <i>Solanum lycopersicum</i> sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.	33
Figura 8 - Réplicas das amostras de solo oriundas do Ponto 1 - C2 do PSJ/TO, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com <i>Solanum lycopersicum</i> sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.	33
Figura 9 - Réplicas das amostras de solo oriundas do Ponto 2 - C5 do PSJ/TO, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com <i>Solanum lycopersicum</i> sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.	33
Figura 10 - Réplicas das amostras de solo oriundas do Ponto 3 - C8 do PSJ/TO,	

utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com <i>Solanum lycopersicum</i> sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.....	34
Figura 11 - Réplicas das amostras de solo oriundas do Ponto 4 - M2 do PSJ/TO, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com <i>Solanum lycopersicum</i> sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.....	34
Figura 12 - Réplicas das amostras de solo oriundas do Ponto 6 - REF 02 do PSJ/TO, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com <i>Solanum lycopersicum</i> sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.....	34
Figura 13 - Réplicas das amostras de solo oriundas do Ponto 7 - REF 04 do PSJ/TO, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com <i>Solanum lycopersicum</i> sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.....	34
Figura 14 - réplicas das amostras do Controle-teste, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com <i>Zea mays</i> sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas -Tocantins/ Brasil.....	35
Figura 15 - Réplicas das amostras do Ponto 1 - C2, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com <i>Zea mays</i> sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.....	35
Figura 16 - Réplicas das amostras do Ponto 2 - C5, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com <i>Zea mays</i> sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.....	35
Figura 17 - Réplicas das amostras do Ponto 3 - C8, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com <i>Zea mays</i> sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.....	36
Figura 18 - Réplicas das amostras do Ponto 4 - M2, utilizadas no experimento	36
Figura 19 - Réplicas das amostras do Ponto REF 0 2 , utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com <i>Zea mays</i> sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.....	36
Figura 20 - Réplicas das amostras do Ponto REF 04, utilizadas no	

experimento ecotoxicológicos, com <i>Zea mays</i> sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.	37
Figura 21 - Germinação de <i>Solanum lycopersicum</i> sob exposição a amostras de solos com variedade agrícola do PSJ/ TO, desenvolvidos durante os anos de 2023/ 2024, no Laboratório de Ecotoxicologia do Campus Palmas- IFTO/ Brasil.	40
Figura 22 - Germinação de <i>Solanum lycopersicum</i> sob exposição a amostras de solos nativos do PSJ/ TO, desenvolvidos durante os anos de 2023/ 2024, no Laboratório de Ecotoxicologia do Campus Palmas- IFTO/ Brasil.....	41
Figura 23 - Massa fresca média (g) de <i>Solanum lycopersicum</i> cultivado em diferentes tratamentos de solo agrícola (CTRL, C2, C5, C8, M2 e REF). Os valores refletem o acúmulo de biomassa sob influência de distintos tipos de solo após o período de germinação.	43
Figura 24 - Massa seca média (g) de <i>Solanum lycopersicum</i> cultivado em diferentes tratamentos de solo agrícola (CTRL, C2, C5, C8, M2 e REF). A biomassa seca representa o acúmulo de matéria vegetal isenta de umidade, indicando o desempenho dos tratamentos após o ciclo de germinação.....	43
Figura 25 - Germinação de <i>Zea mays</i> sob exposição a amostras de solos com variedade agrícola do PSJ/ TO, desenvolvidos durante os anos de 2023/ 2024 no Laboratório de Ecotoxicologia do Campus Palmas- IFTO/ Brasil.....	45
Figura 26 - Germinação de <i>Zea mays</i> sob exposição a amostras de solos nativos do PSJ/ TO, desenvolvidos durante os anos de 2023/ 2024 no Laboratório de Ecotoxicologia do Campus Palmas- IFTO/ Brasil.....	45
Figura 27 - Massa fresca média (g) de <i>Zea mays</i> cultivado em diferentes tratamentos de solo agrícola (CTRL, C2, C5, C8, M2 e REF). A biomassa fresca representa o acúmulo de matéria vegetal sob influência dos tratamentos após o período de germinação.	47
Figura 28 - Massa seca média (g) de <i>Zea mays</i> cultivado em diferentes tratamentos de solo agrícola (CTRL, C2, C5, C8, M2 e REF). A biomassa seca indica o acúmulo de matéria vegetal isenta de umidade, refletindo o desempenho dos tratamentos após o desenvolvimento inicial das plantas.	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pontos de amostragem da matriz ambiental (solo) para realização de ensaios ecotoxicológicos e análises físico-químicas.	28
Quadro 2 - Comparativo dos parâmetros químicos dos solos.	38
Quadro 3 - Valores de p obtidos nas comparações múltiplas entre os tratamentos (C2, C5, C8, Ctrl, M2 e REF), referentes à taxa de germinação de <i>Solanum lycopersicum</i> . Os valores representam o nível de significância das diferenças entre pares de tratamentos, com destaque para comparações com $p < 0,05$	44
Quadro 4 - Valores de p obtidos na comparação entre os tratamentos de solo (C2, C5, C8, M2, REF_2 e REF_4) e o controle (CTRL), com base nas médias de massa seca de <i>Zea mays</i> . Os níveis de significância estão indicados por “*” ($p < 0,05$) e “.” ($p < 0,1$).	49
Quadro 5 - Valores de p obtidos na comparação entre os tratamentos de solo (C2, C5, C8, M2, REF_2 e REF_4) e o controle (CTRL), com base nas médias de massa fresca de <i>Solanum lycopersicum</i> . Diferenças estatisticamente significativas estão indicadas por “*” ($p < 0,05$).	50

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA	American Public Health Association
ASTM	American Society for Testing Materials
IFTO	Instituto Federal do Tocantins
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
2.	OBJETIVO.....	18
2.1.	Objetivo Geral:.....	18
2.2.	Objetivos Específicos:	18
3.	REVISÃO DE LITERATURA.....	19
3.1.	Ecotoxicologia e bioensaios com sementes.....	19
3.2.	Diretriz Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) 208/2006: Ensaio de toxicidade terrestre com plantas	20
3.3.	Características das monocotiledôneas e eudicotiledôneas	21
3.4.	Fruticultura irrigada e impactos ambientais e socioeconômicos	22
3.5.	Efeitos de contaminantes na germinação e desenvolvimento inicial	24
3.6.	Implicações para o manejo sustentável	25
3.7.	Capacitação para sustentabilidade na fruticultura irrigada.....	26
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1.	Caracterização do local e localização	27
4.2.	Pontos de amostragem.....	27
4.3.	Coleta de amostras.....	27
4.4.	Ensaio ecotoxicológico	29
4.5.	Semeadura e Germinação	31
4.6.	Processamento para avaliação dos efeitos pós-exposição	32
4.7.	Teste com <i>Solanum Lycopersicum</i> sob exposição de amostras de solos coletados na área de estudo	32
4.8.	Teste com <i>Zea mays</i> sob exposição de amostras de solos coletados na área de estudo	35
5.	RESULTADOS.....	37
5.1.	Análise Físico-Química dos solos	37
5.2.	Análise Ecotoxicológica	40
5.2.1.	Germinação e Crescimento de <i>Solanum lycopersicum</i> (Tomate).....	40
5.2.2.	Avaliação da Biomassa: Massa Fresca e Massa Seca	42
5.2.3.	Germinação e Crescimento de <i>Zea mays</i> (Milho)	45
5.2.4.	Avaliação da Biomassa: Massa Fresca e Massa Seca	47
6.	DISCUSSÃO.....	50
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
	REFERÊNCIAS.....	54
	APÊNDICE A- APLICAÇÃO DO PROTOCOLO OECD 208/2006 NA PESQUISA	65

1. INTRODUÇÃO

Desde o advento da Revolução Verde, as alterações nos processos produtivos propiciaram a facilitação e a aceleração da oferta de alimentos. Contudo, essas inovações tecnológicas também provocaram modificações ambientais que impactaram, de forma direta e indireta, a qualidade de vida humana. A produção agrícola passou a centrar-se na utilização de agentes químicos para a proteção das culturas e aumento da produtividade (MOREIRA et al., 2002), ocasionando efeitos tóxicos sobre os ecossistemas, além de gerar desequilíbrios ambientais e problemas à saúde humana (BELCHIOR et al., 2014).

Muitas vezes, os utilizadores dos produtos químicos não seguem as recomendações dos fabricantes, utilizando-os diferentemente do modo e cultura conforme recomendado em bula pelo seu fabricante. Existem desde reguladores a inibidores de crescimento diversos, como por exemplo: inseticidas, fungicidas, acaricidas, mas, os que lideram as vendas de agrotóxicos são os herbicidas, com 48% do total, seguidos por inseticidas em 25% e fungicidas com 22% (Pelaez *et al.*, 2010).

No Brasil não é diferente! Muito pelo contrário, é um dos países que sempre se destacou como um dos maiores consumidores de pesticidas. Desde os anos 90, com o avanço das tecnologias no âmbito de maquinário e no desenvolvimento de técnicas agrícolas para ampliar a produtividade, que a agricultura brasileira tem sido praticada sempre em ritmo de expansão incluindo aumento de áreas florestadas que são substituídas por culturas diversas (Belchior *et al.*, 2014).

O uso sustentável dos agrotóxicos ainda pouco tem sido adotado pelo agronegócio brasileiro e os riscos de exposição aos resíduos dos químicos ainda são ignorados. No entanto, os impactos ambientais devido ao uso indiscriminado de pesticidas, principalmente na agricultura, têm deixado consequências no ambiente, a partir da contaminação dos recursos naturais culminando com a extinção de espécies da fauna e da flora, considerado este um impacto de ordem irreversível ao ecossistema.

Os efeitos tóxicos causados por poluentes naturais ou sintéticos sobre quaisquer constituintes dos ecossistemas são estudados pela ecotoxicologia, tornando possível avaliar a toxicidade das substâncias químicas e a sua dinâmica ambiental. A ferramenta permite verificar como os ecossistemas metabolizam, transformam, degradam, eliminam, acumulam e sofrem ação da intoxicação dos produtos químicos que atingem estes sistemas de forma direta ou indireta (Azevedo & Chasin, 2004; Zagatto &

Bertoletti, 2006), com avaliação dos efeitos dos contaminantes na biosfera, com análises, em grande escala, dos fenômenos químicos ambientais da exposição e dos efeitos na organização biológica (Guilio & Newman, 2008). Além disso, é fundamental para registro, regulamentação e monitoramento ambiental de produtos químicos, especialmente herbicidas. O estabelecimento da toxicidade relativa para espécies de diferentes níveis da cadeia trófica é fundamental para estabelecer o grau de efeito de um herbicida nos ambientes terrestre e aquático.

E a partir da avaliação da contaminação advinda com o uso dos pesticidas, os cientistas de todo o mundo tem buscado aumentar a compreensão da relação dos poluentes químicos com o ambiente que estão sendo liberados, almejando identificar o impacto e os riscos a diferentes organismos expostos a contaminação em meios aquáticos e terrestres (Stützer *et al.*, 2003).

No entanto, a velocidade com que novos produtos químicos surgem nesse poderoso mercado de abrangência internacional, propicia incrementos dos pesticidas utilizados na agricultura. Para a maioria dos compostos ainda não existem estudos científicos aprofundados sobre a sua toxicidade e os efeitos a organismos não – alvos são inúmeros. Um dos principais problemas que tem afligido a comunidade científica é o descompasso com que os investimentos financeiros são liberados, principalmente, no Brasil. Assim, é impraticável a produção científica de qualidade acompanhar a mesma velocidade com que novos pesticidas entram em contato com o ambiente. Mesmo diante deste disparate, existem registros para muitos dos compostos que já foram até banidos o seu uso em alguns países. efeitos da utilização de agroquímicos expõem o ambiente ainda faz parte de um nicho a ser descoberto, logo que muitos dessas substâncias levam muito tempo para serem percebidas e seus efeitos agudos e crônicos serem mais bem avaliados sobre as suas atuações, comportamentos no ambiente (Carvalho *et al.*, 2011).

Pesticida banido há mais de 30 anos ainda representa risco no Brasil, como é o caso do Hexaclorobenzeno, usado em grande escala, nas casas e na agricultura, para erradicar insetos, banido da agricultura brasileira nos anos 80, porém o produto apresenta alto teor tóxico e os resíduos químicos podiam não se decompor no solo, contaminando as fontes de água. Apesar de ser proibido no Brasil, o hexaclorobenzeno (BHC) é um dos poluentes ambientais mais perigosos e sua utilização pode comprometer o solo, as plantas, os mananciais e os animais. Nas propriedades rurais onde o hexaclorobenzeno (BHC) é utilizado, muitas vezes, o hexaclorobenzeno (BHC) acaba

sendo deixado em locais impróprios, como galpões ou celeiros. Outras vezes, alguns agricultores armazenam esse produto em galpões sem proteção, o que pode provocar acidentes não só para o homem, mas também para os animais. Isso foi constatado, na prática, em uma área rural do município paranaense de Kalore. Além da mortalidade observada em 15 bovinos adultos, foi possível atuar em uma perícia para fechar o círculo de toxicidade fornecendo dados às autoridades com provas (Nogueira, 2003).

De acordo com os relatos de Brown *et al.* (2019), embora a problemática ambiental estudada pela ecotoxicologia remeta a uma viagem no tempo que coincide com o início da estruturação da sociedade em cidades, somente ficou conhecida como uma ciência e ganhou força a partir da década de 1970. Por outro lado, a subárea destinada ao estudo dos problemas decorrentes da contaminação no compartimento terrestre despontou na década de 1990 e se intensificou no Brasil nos primeiros anos do novo milênio.

Pelo fato de o solo ter estreita relação com o homem, a partir de atividades agrícolas, os estudos ecotoxicológicos têm chamado atenção de órgãos de regulação ambiental como alternativa de estimar os impactos reais de atividades potencialmente poluidoras sobre os organismos do solo e, por conseguinte, nos processos ecológicos envolvidos com a biota terrestre.

Para Da Cruz *et al.* (2021), as principais Agências Normatizadoras de ensaios ecotoxicológicos são: American Public Health Association (APHA), American Society for Testing Materials (ASTM), United States Environmental Protection Agency (USEPA), Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), International Organization for Standardization (ISO) e Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). Algumas normas brasileiras são utilizadas para a avaliação e a quantificação dos efeitos tóxicos do efluente, os métodos de ensaios ecotoxicológicos já normatizados pela ABNT, tais como: NBR 12713 (Ensaio com *Daphnia* – ecotoxicidade aguda); NBR 13373 (Ensaio com *Ceriodaphnia* - ecotoxicidade crônica); NBR 12648 (Ensaio com algas – ecotoxicidade crônica); NBR 15088 (Ensaio com peixes – ecotoxicidade aguda); NBR 15499 (Ensaio com peixes – ecotoxicidade crônica); NBR 15411 (Ensaio com *Vibrio fischeri* – ecotoxicidade aguda).

A realização deste estudo justifica-se pela crescente intensificação agrícola em áreas irrigadas, como o Perímetro de Irrigação São João, em Porto Nacional – TO, onde o uso frequente de defensivos agrícolas pode comprometer a qualidade do solo

e, conseqüentemente, afetar o desenvolvimento vegetal. Embora a análise química convencional forneça informações relevantes sobre a fertilidade, não é suficiente para detectar efeitos tóxicos sutis que podem comprometer a germinação e o crescimento inicial das plantas. Nesse sentido, os bioensaios ecotoxicológicos com espécies de importância agrícola, como o milho (*Zea mays*) e o tomate (*Solanum lycopersicum*), tornam-se ferramentas indispensáveis para a avaliação integrada dos solos.

Além de contribuir para o diagnóstico precoce de possíveis impactos ambientais, este trabalho fornece subsídios científicos para o manejo sustentável da fruticultura irrigada no Tocantins, setor de grande relevância econômica e social para a região. Dessa forma, os resultados poderão auxiliar tanto na adoção de práticas agrícolas mais seguras quanto no embasamento de políticas públicas voltadas à conservação do solo e à segurança alimentar.

Assim, a avaliação ecotoxicológica pode ser muito útil no controle, regulamentação e classificação de substâncias tóxicas quanto ao potencial de seu risco ambiental, a identificação do perigo e a avaliação da relação dose e resposta, consideradas as etapas iniciais no processo de avaliação da toxicidade ou risco ambiental (USEPA, 2002).

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral:

O objetivo do trabalho foi avaliar o potencial germinativo de sementes de monocotiledôneas e dicotiledôneas, com solos supostamente contaminados do perímetro irrigado São João, município de Porto Nacional TO.

2.2. Objetivos Específicos:

- Realizar o levantamento das principais culturas do Perímetro São João;
- Analisar as propriedades físico-química dos solos coletados;
- Avaliar os efeitos de um possível agrotóxico nas culturas;
- Avaliar o potencial germinativo de cada ponto.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Ecotoxicologia e bioensaios com sementes

A ecotoxicologia é a ciência essencial para entender como os contaminantes ambientais podem afetar a biodiversidade. Combinando princípios fundamentais da toxicologia e da ecologia, a ecotoxicologia integra o estudo dos efeitos nocivos causados por substâncias químicas sobre os organismos e seus ecossistemas (Beketov *et al.*, 2013; Relyea, 2005; Sharma e Dubey, 2005). Abrangendo desde análises moleculares até avaliações em nível de comunidades ecológicas, esse estudo permite uma visão dos impactos causados por diferentes poluentes, como agrotóxicos, metais e resíduos industriais (Gill e Tuteja, 2010; Nagajyoti, Lee e Sreekanth, 2010).

Na agricultura moderna, esse estudo tem uma relevância particular no monitoramento de áreas de cultivos intensivos. Sua aplicação permite, além de avaliar a toxicidade de agrotóxicos antes de sua liberação no mercado, identificar bioindicadores sensíveis que mostram a presença de possíveis contaminantes (Ali, Khan e Sajad, 2013; Pilon-Smits, 2005). Também fornece subsídios fundamentais para o desenvolvimento de estratégias de biorremediação em solos degradados (Mahar *et al.*, 2016; Tarla *et al.*, 2020).

Como instrumentos biológicos excepcionais para o diagnóstico de saúde do solo, as plantas, em especial suas sementes, são elementos naturais que possuem a capacidade de manifestar, de forma mensurável, os impactos causados por alterações ambientais (Cruz *et al.*, 2013; Tamada *et al.*, 2012). Por permitirem detectar desde inibições no processo germinativo até malformações radiculares, a utilização das sementes em estudo de ecotoxicologia serve como alerta precoce para a presença de contaminantes no ambiente (Aguiar, Andrade-Vieira e Oliveira David, de, 2016; Fagundes, Camargos e Costa, 2011; Peduto, Jesus e Kohatsu, 2019).

No monitoramento ambiental, os bioensaios com sementes surgem como ferramentas estratégicas para a detecção precoce de contaminações. Seu valor preventivo reside na capacidade de gerar informações cruciais para o gerenciamento sustentável de áreas agrícolas, auxiliando na proteção dos recursos naturais e na garantia da segurança alimentar (Emmanouil, Giannakis e Kyzas, 2024; Luo *et al.*, 2018; Saha e Baudh, 2024). A sensibilidade analítica junto com o rigor metodológico reforça esses testes como componentes importantes da ecotoxicologia, fornecendo

dados robustos para avaliar os efeitos das atividades antrópicas nos agroecossistemas (Gong *et al.*, 2001; Nogueira Cardoso e Lopes Alves, 2012).

3.2. Diretriz Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) 208/2006: Ensaio de toxicidade terrestre com plantas

A OCDE 208/2006 estabelece um protocolo padronizado para a realização do teste de toxicidade terrestre em plantas, com foco específico na avaliação dos efeitos de substâncias químicas sobre a emergência de plântulas e o crescimento inicial (Mitchell *et al.*, 1988). Este ensaio é importante na área da ecotoxicologia, fornecendo dados essenciais para a avaliação do risco ambiental de diversos compostos, incluindo produtos químicos industriais, biocidas e, de maneira proeminente, produtos fitossanitários utilizados na agricultura (Nowacka *et al.*, 2023). Ao analisar as fases iniciais do desenvolvimento vegetal, o teste busca identificar potenciais impactos negativos que possam comprometer o estabelecimento e a vitalidade das plantas em ambientes terrestres (Staveley *et al.*, 2018).

A metodologia do teste OCDE 208/2006 trata da exposição de sementes de plantas terrestres selecionadas a diferentes concentrações da substância de teste, aplicadas diretamente no solo ou sobre a sua superfície (Martin-Closas, Botet e Pelacho, 2014). Durante um período predeterminado, são monitorados diversos parâmetros para quantificar os efeitos da exposição. Destacando a taxa de emergência das plântulas, que indica a capacidade das sementes de germinarem e romperem a superfície do solo, e o crescimento inicial das plantas e a biomassa das plantas jovens (Klekotka *et al.*, 2022; Mendes da Silva e Andrade-Vieira, 2025). A observação de sintomas visíveis de fitotoxicidade, como clorose, necrose ou deformações, também é parte integrante da análise (Cao *et al.*, 2007).

A relevância ecológica do teste OCDE 208/2006 reside na sua capacidade de fornecer informações robustas sobre os potenciais danos que substâncias químicas podem causar em ecossistemas terrestres (Fellmann *et al.*, 2024; Nelemans *et al.*, 2017). As plantas são a base da maioria das cadeias alimentares e desempenham um papel fundamental na manutenção da biodiversidade e na provisão de serviços ecossistêmicos essenciais. A identificação de efeitos adversos em estágios iniciais do desenvolvimento vegetal é, portanto, crucial para prevenir a contaminação ambiental e proteger a saúde dos ecossistemas (Richter *et al.*, 2016; Rogacz *et al.*, 2018). Os

resultados obtidos através deste teste são frequentemente utilizados por agências regulatórias em todo o mundo para a tomada de decisões informadas sobre o registro, a restrição ou a proibição de substâncias químicas que representem riscos significativos para o ambiente (Ceger *et al.*, 2022; Chapman, Fairbrother e Brown, 1998).

Em suma, a diretriz OCDE 208/2006 representa uma ferramenta fundamental para a avaliação da segurança ambiental de substâncias químicas, contribuindo para a proteção da flora terrestre através da identificação de potenciais efeitos tóxicos em seus estágios iniciais de desenvolvimento (Bellingeri *et al.*, 2024; Garralaga *et al.*, 2022). A padronização da metodologia garante a comparabilidade dos resultados entre diferentes estudos e laboratórios, fortalecendo a base científica para a implementação de medidas regulatórias eficazes (Brooks *et al.*, 2019). A inclusão desta diretriz em referenciais teóricos de pesquisas ambientais demonstra a preocupação em utilizar métodos reconhecidos internacionalmente para a avaliação dos impactos de atividades humanas sobre o meio ambiente (Jang *et al.*, 2024).

3.3. Características das monocotiledôneas e eudicotiledôneas

Dentro dos principais grupos das angiospermas estão as monocotiledôneas e eudicotiledôneas, apresentam diferenças marcantes em sua estrutura e fisiologia que influenciam diretamente na interação com o ambiente (Conklin *et al.*, 2019; Perico, Tan e Langdale, 2022; Soltis e Soltis, 2004). Estes vegetais são diferenciados especialmente por características como o número de cotilédones, padrão de nervação foliar e organização do sistema radicular. As monocotiledôneas possuem um único cotilédone, nervuras paralelas e raízes fasciculadas, já as eudicotiledôneas apresentam dois cotilédones, nervuras reticulares e raízes pivotantes (Wang *et al.*, 2019). Estas diferenças refletem distintas estratégias de absorção de nutrientes e diferentes respostas aos estresses ambientais (Liu, Zhou e Fu, 2024).

No contexto ecotoxicológico, algumas espécies se destacam como modelos ideais pela sensibilidade e importância agrícola. Entre as monocotiledôneas, o milho (*Zea mays*) espécie amplamente utilizada, particularmente sensível a metais pesados e herbicidas (Atta *et al.*, 2023). O arroz (*Oryza sativa*), especialmente relevante para estudos em solos alagados, enquanto o sorgo (*Sorghum bicolor*) mostra sua utilidade em áreas com estresse hídrico (Alzahrani, Abdulbaki e Alsamadany, 2024; Arinzechi

et al., 2024). No grupo das eudicotiledôneas, a soja (*Glycine max*) e o feijão (*Phaseolus vulgaris*) são frequentemente utilizados em avaliações de toxicidade de agrotóxicos, com respostas marcantes no desenvolvimento radicular (Deveci Ozkan e Aksoy, 2019; Grecco *et al.*, 2024). A alface (*Lactuca sativa*), por sua sensibilidade ampla e tempo de resposta rápido, se tornou espécie padrão em muitos protocolos de teste (Cunha Neto, da *et al.*, 2023).

A diferença da sensibilidade destes grupos aos contaminantes ambientais cria um aspecto importante para os estudos ecotoxicológicos. As respostas a herbicidas variam significativamente entre os grupos, com as monocotiledôneas geralmente apresentando maior tolerância a compostos como o glifosatom (Chaudhary *et al.*, 2024). No caso dos metais pesados, os padrões de acúmulo e distribuição nos tecidos vegetais também diferem entre os grupos, com as eudicotiledôneas frequentemente acumulando maiores quantidades na raiz (Piršelová *et al.*, 2011). Estas variações nas respostas aos contaminantes reforçam a importância de incluir representantes de ambos os grupos nos programas de monitoramento ambiental, permitindo uma avaliação mais abrangente dos riscos ecotoxicológicos em áreas agrícolas (Liné *et al.*, 2021)

Entender essas diferenças entre monocotiledôneas e eudicotiledôneas é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de monitoramento ambiental (Terwayet Bayouli *et al.*, 2021). A seleção criteriosa dos organismos-teste, considerando suas características específicas e padrões de resposta aos contaminantes, permite obter dados mais representativos da qualidade do solo. Esta abordagem comparativa entre os dois grupos vegetais oferece valiosos insights para o manejo sustentável dos solos agrícolas e para a preservação dos ecossistemas (Bierkens *et al.*, 1998).

3.4. Fruticultura irrigada e impactos ambientais e socioeconômicos

A fruticultura irrigada vem ganhando espaço como um dos pilares da agricultura moderna, especialmente em regiões onde a disponibilidade hídrica é limitada. No Brasil, polos como o Vale do São Francisco e áreas do Tocantins destacam-se pela produção intensiva de frutas, melhorando a economia regional e gerando emprego e renda (Baiardi e Clotilde Meirelles Ribeiro, 2023; Santos Barbosa, Dos, Lima e Ferreira, 2021). No entanto, esse modelo agrícola traz uma série de impactos ambientais e

socioeconômicos que exigem atenção e manejo sustentável para garantir sua viabilidade a longo prazo (Hagel *et al.*, 2019).

A irrigação intensiva, do ponto de vista ambiental, pode trazer problemas como a salinização dos solos, especialmente em regiões com alta evaporação. Isso faz com que o acúmulo de sais altere a estrutura do solo, reduzindo sua fertilidade e afetando o crescimento das plantas (Pessoa *et al.*, 2022; Tarolli *et al.*, 2024). Além disso, o uso excessivo de agrotóxicos aumenta a contaminação do solo e de recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Esses poluentes além de prejudicam a biodiversidade local, afetando microrganismos do solo, insetos polinizadores e fauna aquática, também podem entrar na cadeia alimentar, oferecendo riscos à saúde humana (Anjaria e Vaghela, 2024; Elumalai *et al.*, 2025).

Além dos impactos ambientais, a fruticultura irrigada também traz impactos socioeconômicos, gerando emprego e movimentando a economia regional, apesar disso muitas vezes enfrenta críticas relacionadas às condições de trabalho (Vital e Sampaio, 2004). A falta de equipamentos de proteção individual (EPIs) e a exposição prolongada a agrotóxicos colocam em risco a saúde dos trabalhadores rurais. Outro desafio é a desigualdade na distribuição dos benefícios econômicos, já que grandes produtores concentram a maior parte dos lucros, enquanto os pequenos agricultores enfrentam dificuldades para competir no mercado (Buralli *et al.*, 2018; Helfand, Rada e Magalhães, 2017; Silvério *et al.*, 2020). Além disso, a dependência de insumos externos, como fertilizantes e pesticidas, aumenta os custos de produção, tornando o sistema vulnerável a variações de preços e crises de abastecimento (Silva León *et al.*, 2025).

Apesar de enfrentar esses desafios, a fruticultura irrigada pode ser de forma mais sustentável com a adoção de práticas como o manejo integrado de pragas (MIP), o uso eficiente da água por meio de sistemas de irrigação precisos e a recuperação de áreas degradadas (Akio e Tsukasa, 2021; Gheyi *et al.*, 2022; Leonel *et al.*, 2012). Políticas públicas que incentivem a capacitação de trabalhadores rurais, o monitoramento ambiental rigoroso e a transição para sistemas agroecológicos também são essenciais para equilibrar produtividade e conservação (McKay, Nehring e Catacora-Vargas, 2024).

A fruticultura irrigada é um setor importante para a economia agrícola, mas seu futuro depende da capacidade de conciliar produção com sustentabilidade (Akio e Tsukasa, 2021). A implementação de tecnologias limpas, a valorização da mão de obra

rural e a gestão responsável dos recursos naturais são os principais passos para mitigar impactos negativos e garantir que essa atividade continue a ser uma fonte de desenvolvimento regional sem comprometer o meio ambiente ou a saúde das comunidades (Costa e Bastos, 2013; Fiore *et al.*, 2024; Paiva *et al.*, 2024).

3.5. Efeitos de contaminantes na germinação e desenvolvimento inicial

A germinação e o desenvolvimento inicial das plantas passam por fases críticas extremamente sensíveis com ação de contaminantes presentes no solo. Os processos fisiológicos essenciais podem sofrer interferências significativas, mesmo que em pequenas concentrações dessas substâncias tóxicas, comprometendo todo o ciclo de vida vegetal (An *et al.*, 2009; Madejón *et al.*, 2015). Esses efeitos podem se manifestar de várias formas, desde a inibição total da germinação até alterações morfológicas e fisiológicas nas plântulas (Luo *et al.*, 2024).

Na fase de germinação, os contaminantes frequentemente causam atraso ou redução na porcentagem de sementes que conseguem emergir. Esse efeito é particularmente evidente em solos com histórico de aplicação intensiva de agrotóxicos, onde se observa diminuição significativa na taxa germinativa (Helander *et al.*, 2019; Możdżeń *et al.*, 2021). Quando ocorre a emergência, as plântulas frequentemente apresentam desenvolvimento anômalo, com encurtamento radicular, deformações no hipocótilo e redução na biomassa (Kalinhoff e Calderón, 2022; Nogueira *et al.*, 2011; Poddar *et al.*, 2023). O sistema radicular é especialmente vulnerável, já que entra em contato direto com os contaminantes do solo, e seu comprometimento inicial pode refletir negativamente em todas as fases posteriores do desenvolvimento vegetal (Akbar *et al.*, 2024; Collin *et al.*, 2022).

A avaliação desses efeitos tem é muito importante para o diagnóstico precoce da qualidade do solo. Parâmetros como porcentagem de germinação, comprimento radicular e biomassa das plântulas fornecem indicadores sensíveis e confiáveis do potencial tóxico de solos contaminados (Parera, Parera e Feresin, 2023; Teacă e Bodîrlău, 2008). Essas informações são cruciais para a tomada de decisões sobre manejo agrícola e recuperação de áreas degradadas, contribuindo para práticas mais sustentáveis na fruticultura irrigada.

3.6. Implicações para o manejo sustentável

Os resultados de estudos ecotoxicológicos com sementes ajudam com contribuições fundamentais para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis em polos de fruticultura irrigada. A avaliação do potencial germinativo em solos submetidos a diferentes manejos permite identificar os níveis críticos de contaminação e estabelecer parâmetros seguros para o uso de insumos agrícolas (Alengebawy *et al.*, 2021; Freitas e Silva, 2022). Quando os bioensaios demonstram efeitos negativos significativos na germinação e desenvolvimento inicial das plantas, isso serve como alerta para a necessidade de revisão das práticas de manejo adotadas na região (Mitelut, Popa e Mitelut, 2011).

Os dados obtidos através desses testes podem colaborar na elaboração de planos de manejo integrado que equilibrem produtividade e conservação ambiental. A redução no uso de agrotóxicos, a adoção de técnicas de aplicação mais precisas e a rotação de culturas surgem como alternativas viáveis quando os bioindicadores mostram contaminação excessiva do solo (Dubey *et al.*, 2020; Jalli *et al.*, 2021; Nandillon, Guinet e Munier-Jolain, 2024). A escolha de espécies vegetais mais tolerantes aos contaminantes presentes, baseada nos resultados dos testes de germinação, pode ser outra estratégia eficaz para áreas onde a descontaminação completa ainda não é possível (Potashev, Sharonova e Breus, 2014).

Os sistemas de irrigação também podem ser otimizados com base nas informações ecotoxicológicas. Em áreas onde se detecta acúmulo de sais ou lixiviação de contaminantes, a implementação de métodos mais eficientes como o gotejamento ou a irrigação por microaspersão pode minimizar esses problemas (Liu *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023). Além disso, a integração dos resultados dos bioensaios com análises físico-químicas do solo permite desenvolver estratégias de correção e fertilização mais adequadas, que considerem não apenas as necessidades nutricionais das plantas, mas também a preservação da qualidade do solo a longo prazo (Garg *et al.*, 2022; Parameswari *et al.*, 2025).

A médio e longo prazo, a incorporação rotineira desses testes ecotoxicológicos nos programas de monitoramento ambiental das áreas irrigadas pode contribuir para a construção de um modelo de fruticultura mais sustentável. Ao fornecer informações precoces sobre processos de degradação do solo, esses métodos permitem intervenções corretivas antes que os danos se tornem irreversíveis (Denora *et al.*,

2023; Uslu *et al.*, 2025). Essa abordagem preventiva, aliada a políticas públicas que incentivem boas práticas agrícolas e a capacitação dos produtores, pode transformar os polos de fruticultura irrigada em exemplos de produção agrícola sustentável, onde a alta produtividade convive com a manutenção dos serviços ecossistêmicos e da saúde do solo (Guilherme, Lopes e Corguinha, 2018; Suzuki, Casalinho e Milani, 2024).

3.7. Capacitação para sustentabilidade na fruticultura irrigada

A transição para modelos sustentáveis na fruticultura irrigada demanda um sistema integrado de capacitação que atenda aos diferentes atores da cadeia produtiva. Na base deste ecossistema formativo, agricultores familiares e trabalhadores rurais participam de programas práticos desenvolvidos em unidades demonstrativas, onde técnicas como irrigação de precisão, manejo integrado de pragas e controle biológico são apresentadas em situações reais de produção (Deguine *et al.*, 2021; Golan *et al.*, 2023; Muriithi *et al.*, 2024).

Para técnicos agrícolas e extensionistas rurais, são oferecidos cursos especializados em diagnóstico ambiental rápido, utilizando kits portáteis de análise de solo e água, e treinamentos em sistemas de monitoramento digital. Estes profissionais tornam-se multiplicadores do conhecimento, capacitados para identificar sinais precoces de degradação ambiental e orientar os produtores na adoção de práticas corretivas (Sen *et al.*, 2025; Yadav e Yadav, 2025). Um componente essencial desta formação é o domínio de plataformas digitais de gestão agrícola, que permitem o acompanhamento sistemático dos indicadores de sustentabilidade (Bathaei e Štreimikienė, 2023).

A academia desempenha papel crucial nesta arquitetura formativa, através da oferta de cursos de pós-graduação *latu sensu* que combinam conhecimentos técnicos agrônômicos com noções de economia circular e gestão ambiental (Angulo, Batista e Caicedo 2024; Renfors, 2024). Parcerias entre institutos federais, universidades e empresas privadas resultam em programas de pesquisa aplicada, onde soluções tecnológicas são testadas e adaptadas às realidades locais antes de serem transferidas para o setor produtivo (Fuck, Beatriz e Bonacelli, 2009).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Caracterização do local e localização

A área de estudo está situada no Perímetro de Irrigação São João, município de Porto Nacional, estado do Tocantins, Brasil, devido ao tipo de uso do solo que é praticado, onde foram demarcados seis pontos aleatoriamente nessa área, para coleta de amostras de solo que foram utilizadas nos experimentos ecotoxicológicos realizados em laboratório. Trata-se de uma região marcada pelo uso constante do solo para a produção agrícola intensiva, o que pode acarretar o acúmulo de contaminantes no ambiente, como fertilizantes, pesticidas e outros insumos químicos. Ressalta-se que, em alguns casos, esses contaminantes podem ser aplicados de forma inadequada, seja por excesso, escolha incorreta do produto ou ausência de técnicas corretas de manejo, aumentando os riscos de contaminação e seus impactos ecotoxicológicos.

Para possibilitar o desenvolvimento deste trabalho, foi necessário realizar uma série de atividades de campo e de laboratório, conforme descrito a seguir:

4.2. Pontos de amostragem

Portanto, foram coletadas amostras de solo no Perímetro de Fruticultura São João foram de dois tipos: 1. **Pontos Culturais** (para quatro locais), denominados por: C2 - Açaí, C5 - Mamão, C8 - Mandioca, M2 - Soja e, 2. **Pontos Referências** (dois locais), denominados: REF - 02, REF - 04 (Quadro 1).

4.3. Coleta de amostras

A amostragem de solo foi coletada em glebas diferentes do Perímetro de Irrigação São João, Porto Nacional – TO, também chamado de Projeto São João – PSJ. O principal critério estabelecido para a coleta foi que os locais deveriam ter a presença de algum tipo de plantação e em ambiente com vegetação florestal natural (Figura 1). As amostras de solo foram coletadas com trado do tipo caneca, numa profundidade de 0 – 20 cm e de 20 – 40 cm, etiquetadas e armazenadas em embalagens plásticas, refrigeradas em temperatura de -4°C.

Quadro 1 - Pontos de amostragem da matriz ambiental (solo) para realização de ensaios ecotoxicológicos e análises físico-químicas.

PONTO	LOCALIZAÇÃO	DETALHES/ CULTURA	LATITUDE	LONGITUDE
C2	Lote 282	Açaí, Coco, milho	10°27'42.71"S	48°20'34.13"O
C5	Lote 109	Coco, Mamão, Maracujá	10°26'34.27"S	48°20'22.65"O
C8	Lote 275	Mandioca e milho	10°27'33.44"S	48°20'36.50"O
M2	Próximo à prata 1	Soja e milho	10°28'33.35"S	48°19'50.39"O
REF 02	Nascente Córrego Retiro	Final lote 09	10°26'06.75"S	48°19'15.53"O
REF 04	Ribeirão São João	Sr. Adilton	10°24'45.52"S	48°21'08.59"O

Fonte: Curvina, 2024.

Figura 1 - Área onde foram demarcados e coletados amostras de solos, corresponde: **A.** plantio de açaí; **B.** plantio de soja; **C.** plantio de mamão; **D.** plantio de mandioca; **E, F.** são os locais ditos de Referências; no Perímetro de Irrigação São João, Porto Nacional - TO/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2023.

Os Pontos do Tipo 1 correspondem às áreas com cobertura vegetal agrícola, ou seja, locais onde havia cultivo ativo de espécies como açaí, mamão, mandioca e soja, caracterizados pela probabilidade de uso de pesticidas e outros insumos químicos. Já os Pontos do Tipo 2, denominados Pontos de Referência, são áreas com vegetação florestal nativa e ausência de atividade agrícola, consideradas como ambientes possivelmente isentos de contaminação química, servindo como parâmetro de comparação ambiental.

4.4. Ensaio ecotoxicológico

Afim de verificar às respostas morfofisiológicas aos tratamentos nas parcelas. Foram utilizadas cinco sementes posicionadas à profundidade de 1 cm, em um recipiente plástico cilíndrico transparentes com capacidade volumétrica de 500 ml, preenchidos com 200 g de solo amostral para cada tratamento. De modos que cada um dos 7 tratamentos terá quatro repetições. Contagens diárias de germinação de sementes serão realiza das e o teste terá a duração de 14 dias, contados a partir do nascimento de 50% das sementes no solo controle. Ao final do período experimental serão apurados: números de plantas emergentes, massa fresca e massa seca. A germinação refere-se ao número de plantas que alcançaram a superfície do solo. O material será seco em estufa a 60° por 24 horas. As condições ambientais da sala de cultivo serão controladas conforme o protocolo da Diretriz Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) 208/2006: temperatura de 22 °C $\pm$ 10 °C, umidade relativa de 70% $\pm$ 25%, fotoperíodo de 16 horas de luz e intensidade luminosa de 350 $\pm$ 50 μ E/m²/s.

Plantas – testes: referente às plantas que foram selecionadas para testar a toxicidade das amostras de solos provenientes de locais com algum tipo de plantação (cultura plantada e vegetação florestal nativa), quais sejam: uma eudicotiledônea *Solanum lycopersicum* L. (tomate) e outra monocotiledônea *Zea mays* L. (Milho), adquiridas em estabelecimentos comerciais (Figura 2).

Figura 2 - Sementes das variedades selecionadas para os experimentos de toxicidade do solo (*Solanum lycopersicum* e *Zea mays*), adquiridas em estabelecimentos comerciais de Palmas – TO.



Fonte: Curvina, 2024.

O material foi previamente preparado para receber os experimentos incluindo retirar o solo do freezer 24 horas antes do início do teste, para pesagem do composto-teste (Figura 3).

Figura 3 - Preparo do material para montagem dos experimentos, recipientes descartáveis e amostras de solo; no Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas, Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

A fim de evitar contaminação do teste, preferiu-se utilizar recipientes descartáveis os quais foram identificados para os ensaios ecotoxicológicos. As vidrarias foram esterilizadas, conforme protocolos internos. As condições de temperatura e luminosidades foram todas verificadas pré-exposição (Figura 4).

Figura 4 - preparo do material para os ensaios ecotoxicológicos com plantas, sendo: **A.** Termômetro digital, **B.** recipientes descartáveis identificados, **C.** prateleiras energizadas, ar-condicionado, no Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas, Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

Cada experimento teve duração total de 14 dias, contados a partir da germinação de 50% das sementes testadas, monitorados diariamente. O solo do tipo Controle foi composto por: 75% de areia (autoclavada), 5% de matéria orgânica e 20% de caulino. A padronização do solo controle com proporções específicas de areia, matéria orgânica e caulino garante um substrato isento de contaminantes e com propriedades físico-químicas conhecidas, permitindo comparações válidas com os solos coletados em campo (Figura 5).

Figura 5 - Solo controle para os ensaios ecotoxicológicos com plantas, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas.



Fonte: Curvina, 2024.

4.5. Semeadura e Germinação

A etapa de semeadura para cada experimento consistiu em depositar cinco sementes de milho e cinco sementes com tomate, por vaso, na profundidade de 1 cm em potes de 500g, com 200g de solo, com 4 réplicas e água destilada (Figura 6).

Figura 6 - Etapa de semeadura das plantas **A.** e **B.** *Solanum lycopersicum* e *Zea mays*, **C.** Preparo dos ensaios ecotoxicológicos, no Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas, Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

4.6. Processamento para avaliação dos efeitos pós-exposição

Os parâmetros indicadores avaliados em ambos os ensaios ecotoxicológicos foram: germinação, mortalidade, para os quais foram obtidos pesos fresco e seco do material (folhas e raízes) pós-exposição conforme especificações da OECD (2006). No qual visa contemplar diferentes respostas fisiológicas ao estresse ambiental, ampliando a representatividade dos resultados e assegurando maior robustez ecológica aos dados obtidos. Esse aspecto é fundamental em solos sob influência antrópica, como os do Perímetro de Irrigação São João, que estão sujeitos ao uso de defensivos agrícolas e práticas de manejo intensivo.

Os efeitos registrados no desenvolvimento registrados durante pós-exposição a diferentes amostras de solo coletado no PSJ – TO, durante 2023 e 2024 seguem apresentados para o *Solanum lycopersicum* e *Zea mays*, por réplicas dos tratamentos realizados.

Os tratamentos utilizados nos experimentos ecotoxicológicos foram compostos por sete tipos: 1 Controle montado com solo padrão e 6 tratamentos montados com amostras de solo dos pontos espacializados na área de influência do PSJ/ TO, sendo eles denominados por: Ponto 1 (C2), Ponto 2 (C5), Ponto 3 (C8), Ponto 4 (M2), Ponto 5 (REF 02), Ponto 6 (REF 04).

Os pontos de 1 à 4 são referentes à locais com cobertura do solo plantada com alguma variedade agrícola e os pontos de 5 à 6 são locais com cobertura do solo do tipo vegetação florestal nativa.

4.7. Teste com *Solanum Lycopersicum* sob exposição de amostras de solos coletados na área de estudo

O teste teve duração de 14 dias, contado a partir da germinação de 50% das sementes no solo controle. A partir do período experimental foram registradas imagens fotográficas (Figuras 07 a 20) após os 14 dias de teste para as duas variedades testadas, sob exposição de amostras de solo coletado em diferentes pontos na área de estudo.

CONTROLE *Solanum lycopersicum*

Figura 7 - Réplicas das amostras do Controle-teste, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com *Solanum lycopersicum* sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

PONTO 1 - C2

Figura 8 - Réplicas das amostras de solo oriundas do Ponto 1 - C2 do PSJ/TO, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com *Solanum lycopersicum* sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

PONTO 2-C5

Figura 9 - Réplicas das amostras de solo oriundas do Ponto 2 - C5 do PSJ/TO, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com *Solanum lycopersicum* sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

PONTO 3 - C8

Figura 10 - Réplicas das amostras de solo oriundas do Ponto 3 - C8 do PSJ/TO, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com *Solanum lycopersicum* sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

PONTO 4 - M2

Figura 11 - Réplicas das amostras de solo oriundas do Ponto 4 - M2 do PSJ/TO, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com *Solanum lycopersicum* sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

PONTO 5 - REF 02

Figura 12 - Réplicas das amostras de solo oriundas do Ponto 6 - REF 02 do PSJ/TO, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com *Solanum lycopersicum* sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

PONTO 6 - REF 04

Figura 13 - Réplicas das amostras de solo oriundas do Ponto 7 - REF 04 do PSJ/TO, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com *Solanum lycopersicum* sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

4.8. Teste com *Zea mays* sob exposição de amostras de solos coletados na área de estudo

CONTROLE *Zea mays*

Figura 14 - réplicas das amostras do Controle-teste, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com *Zea mays* sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas -Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

PONTO 1- C2

Figura 15 - Réplicas das amostras do Ponto 1 - C2, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com *Zea mays* sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

PONTO 2 - C5

Figura 16 - Réplicas das amostras do Ponto 2 - C5, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com *Zea mays* sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

PONTO 3 – C8

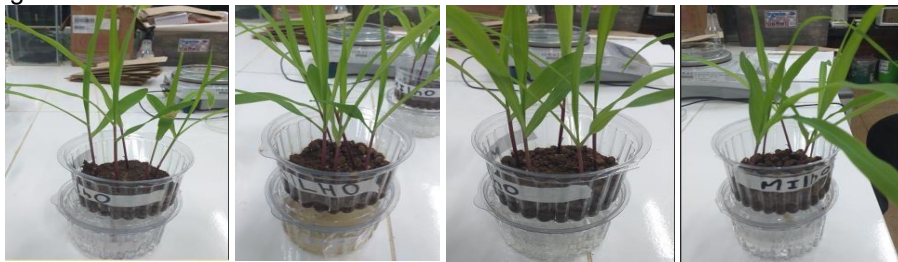
Figura 17 - Réplicas das amostras do Ponto 3 - C8, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com *Zea mays* sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

PONTO 4 - M2

Figura 18 - Réplicas das amostras do Ponto 4 - M2, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com *Zea mays* sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

PONTO 5 - REF 02

Figura 19 - Réplicas das amostras do Ponto REF 02, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com *Zea mays* sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

PONTO 6 – REF 04

Figura 20 - Réplicas das amostras do Ponto REF 04, utilizadas no experimento ecotoxicológicos, com *Zea mays* sob exposição a diferentes amostras de solo, Laboratório de Ecotoxicologia do IFTO/ Palmas - Tocantins/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

5. RESULTADOS

A escolha do milho (*Zea mays*) e do tomate (*Solanum lycopersicum*) como espécies bioindicadoras neste estudo se fundamenta em suas características agrônômicas e fisiológicas. Ambas são espécies amplamente utilizadas em testes ecotoxicológicos por apresentarem germinação rápida, crescimento inicial sensível a alterações ambientais e facilidade de cultivo em condições laboratoriais controladas. Apesar de não pertencerem ao grupo de fruteiras típicas do Perímetro de Irrigação São João, como mamão, açaí e goiaba, essas espécies representam modelos vegetais eficientes para avaliação de toxicidade subletal em solos.

Os solos testados neste estudo, embora aplicados a bioensaios com milho e tomate, são oriundos de áreas de fruticultura irrigada ou adjacentes a ela, sendo influenciados por práticas agrícolas intensivas, como adubação química e aplicação de defensivos. Dessa forma, os efeitos observados nas espécies-teste permitem inferências sobre a qualidade ambiental desses solos e seus potenciais impactos não apenas sobre espécies cultivadas de ciclo curto, mas também sobre frutíferas perenes de interesse econômico regional. Essa abordagem contribui para a avaliação da sustentabilidade agrícola e do uso racional do solo em ambientes irrigados

5.1. Análise Físico-Química dos solos

Quadro com os principais indicadores físico-químicos e de matéria orgânica das amostras de solo, conforme critérios do Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (Teixeira et al., 2017).

Quadro 2 - Comparativo dos parâmetros químicos dos solos.

Indicador	C2	C5	C8	M2	REF 02	REF 04
pH CaCl₂	4,53	5,08	5,05	5,51	5,3	5,28
pH H₂O	5,44	6,26	6,22	6,33	6,15	6,13
Matéria Orgânica (%)	2,02	1,36	1,31	2,82	1,52	1,5
CTC Potencial (T)	3,86	4,42	4,36	6,26	3,1	3,08
Soma de Bases (SB)	1,36	2,12	2,16	4,16	0,2	0,22
Saturação por Bases (V%)	35,24	47,95	49,55	66,46	6,46	6,76
Saturação por Alumínio (m%)	22,73	5,21	4,43	2,35	86,67	85,44
Alumínio trocável (Al³⁺)	0,4	0,18	0,2	0,1	2,9	2,85
Cálcio (Ca²⁺)	0,98	1,55	1,53	2,68	0,11	0,12
Magnésio (Mg²⁺)	0,32	0,58	0,57	1,36	0,02	0,03
Potássio (K⁺)	0,06	0,06	0,06	0,12	0,02	0,02
Fósforo (P - Mehlich)	21,86	18,42	17,92	44,72	23,85	24,13
Enxofre (S)	78,2	87,14	86,02	126,5	-	-
Matéria Orgânica (g/dm³)	11,71	7,88	7,59	16,35	8,81	8,74
Argila (%)	26,0	15,8	16,0	42,0	23,0	22,8
Areia Total (%)	70,6	82,1	81,84	54,04	73,34	73,5
Silte (%)	3,4	2,1	2,16	3,96	3,66	3,7

Fonte: Análises químicas realizadas pelo Laboratório MB Agronegócios (2024), com interpretação segundo TEIXEIRA et al. (2017).

A caracterização físico-química das amostras de solo é etapa fundamental para compreender o comportamento das variáveis edáficas que influenciam direta ou indiretamente na qualidade ambiental e na aptidão agrícola das áreas analisadas. Os

solos avaliados (C2, C5, C8, M2, REF 02 e REF 04) apresentaram diferenças expressivas em relação à fertilidade, à acidez, à capacidade de retenção de nutrientes e à matéria orgânica. Esses dados são fundamentais para interpretar os efeitos ecotoxicológicos observados posteriormente nos ensaios com plantas.

O solo M2 destacou-se como o mais equilibrado em termos de fertilidade química, apresentando pH em CaCl₂ de 5,51, capacidade de troca catiônica (CTC) total de 6,26 cmolc/dm³, alta soma de bases (SB) de 4,16 cmolc/dm³, baixa concentração de alumínio trocável (0,1 cmolc/dm³) e uma elevada porcentagem de saturação por bases (66,46%). Além disso, apresentou o maior teor de matéria orgânica (2,82%) e de carbono total (16,35 g/dm³). Esses indicadores sugerem um solo com boa capacidade de fornecimento de nutrientes, estabilidade estrutural e potencial para sustentar culturas de alta exigência, especialmente sob sistema irrigado.

Por outro lado, os solos de referência nativa (REF 02 e REF 04) apresentaram condições de baixa fertilidade natural. Os dados indicaram alta acidez potencial, com valores de alumínio trocável superiores a 2,8 cmolc/dm³, saturação por alumínio acima de 85% e valores de saturação por bases inferiores a 7%. A CTC total também foi reduzida, com valores em torno de 3,1 cmolc/dm³. Esses fatores configuram um ambiente edáfico de baixa disponibilidade de nutrientes essenciais, baixa estabilidade química e alta toxidez potencial para organismos vegetais sensíveis. Embora representem condições naturais, esses solos são indicados como referência ecológica, e não para uso intensivo na agricultura.

As amostras C5 e C8 apresentaram textura arenosa, com porcentagens de areia superiores a 81%, o que confere baixa capacidade de retenção hídrica e elevada susceptibilidade à lixiviação de nutrientes. Apesar disso, apresentaram fertilidade química intermediária: pH em CaCl₂ entre 5,05 e 5,08; saturação por bases entre 47,95% e 49,55%; e teores baixos de fósforo (18,42 e 17,92 mg/dm³) e potássio (0,06 cmolc/dm³). Esses solos exigem correções nutricionais e práticas de manejo que promovam a conservação da umidade, como cobertura vegetal e uso de adubos orgânicos.

O solo C2, com 26% de argila, apresentou textura mais equilibrada e teores de matéria orgânica ligeiramente superiores aos demais solos de uso agrícola (2,02%). Com pH de 4,53 (CaCl₂) e saturação por bases de 35,24%, esse solo demanda correções moderadas, mas ainda apresenta potencial produtivo com manejo adequado.

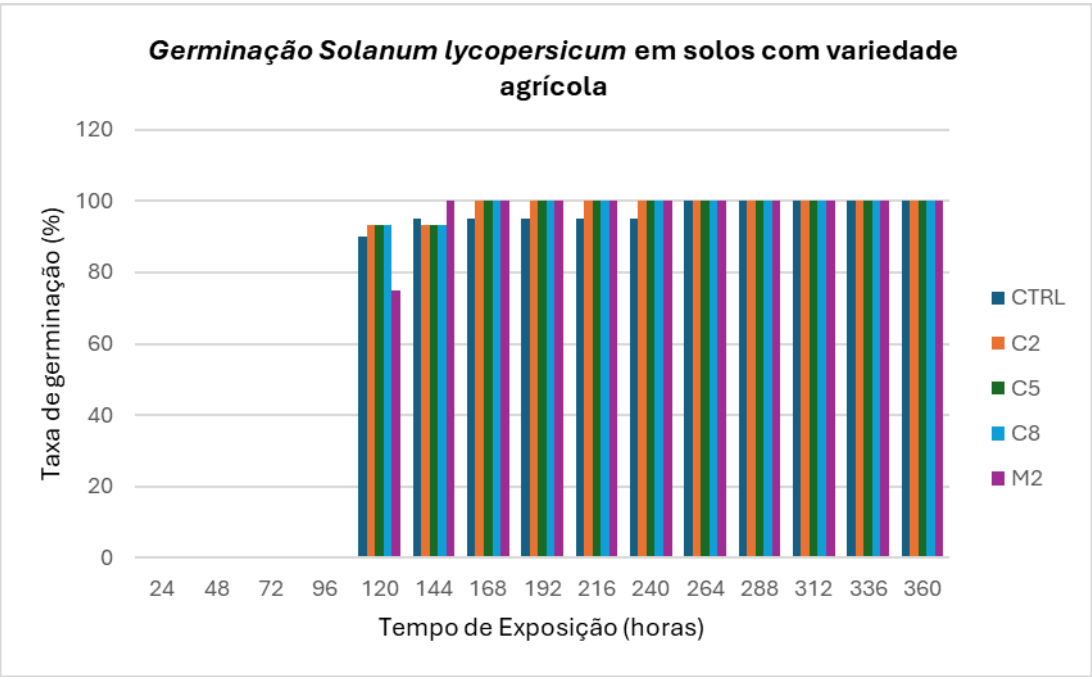
A análise integrada dos dados demonstra a importância de considerar a interação entre variáveis químicas e físicas do solo para o planejamento agrícola, sendo essencial também para compreender os resultados obtidos nos ensaios ecotoxicológicos realizados com *Solanum lycopersicum* e *Zea mays*.

5.2. Análise Ecotoxicológica

5.2.1. Germinação e Crescimento de *Solanum lycopersicum* (Tomate)

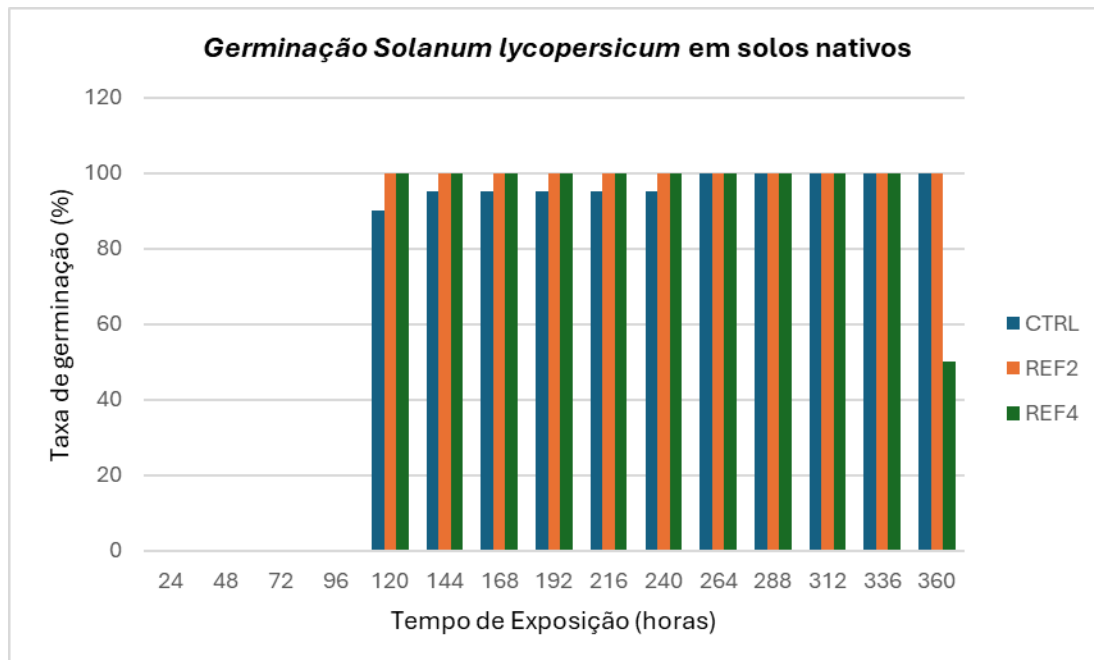
A avaliação da taxa de germinação das sementes de *Solanum lycopersicum* foi realizada ao longo de 360 horas, com registros periódicos conforme os critérios estabelecidos pelo protocolo OECD 208/2006 – *Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test* (Figura 21 e Figura 22). Esse ensaio tem como objetivo detectar possíveis efeitos adversos de substâncias químicas presentes no solo sobre a emergência e o desenvolvimento inicial de plântulas.

Figura 21 - Germinação de *Solanum lycopersicum* sob exposição a amostras de solos com variedade agrícola do PSJ/TO, desenvolvidos durante os anos de 2023/ 2024, no Laboratório de Ecotoxicologia do Campus Palmas- IFTO/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

Figura 22 - Germinação de *Solanum lycopersicum* sob exposição a amostras de solos nativos do PSJ/TO, desenvolvidos durante os anos de 2023/ 2024, no Laboratório de Ecotoxicologia do Campus Palmas-IFTO/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

Os dados obtidos demonstraram que, nos solos com histórico de uso agrícola (C2, C5, C8 e M2), a germinação teve início a partir de 96 horas de exposição, alcançando taxas próximas ou iguais a 100% em até 192 horas. O comportamento observado nos tratamentos C2, C5 e C8 foi bastante semelhante ao do solo controle (CTRL), sugerindo que, nessas amostras, não houve interferência significativa na germinação das sementes.

No entanto, o tratamento M2 apresentou comportamento distinto. A taxa de germinação foi de apenas 75% em 144 horas, atingindo 100% somente após 192 horas. Esse atraso pode indicar a presença de fatores limitantes no solo, como desequilíbrios físico-químicos ou substâncias tóxicas em níveis subletais, que podem ter afetado o processo de emergência das plântulas nas primeiras fases de desenvolvimento.

Nos solos de referência nativa (REF 02 e REF 04), a germinação apresentou bom desempenho até 336 horas, com valores estáveis e próximos a 100%. Contudo, no tempo final de 360 horas, o tratamento REF4 apresentou uma queda acentuada na taxa de germinação, atingindo apenas 50%. Tal comportamento indica a possibilidade de ocorrência de efeitos tardios no desenvolvimento das plântulas, mesmo em

solos aparentemente não impactados por atividades antrópicas. Essa variação reforça a importância do monitoramento em diferentes tempos de exposição, conforme recomenda a OECD (2006), para detectar efeitos crônicos ou de toxicidade acumulada.

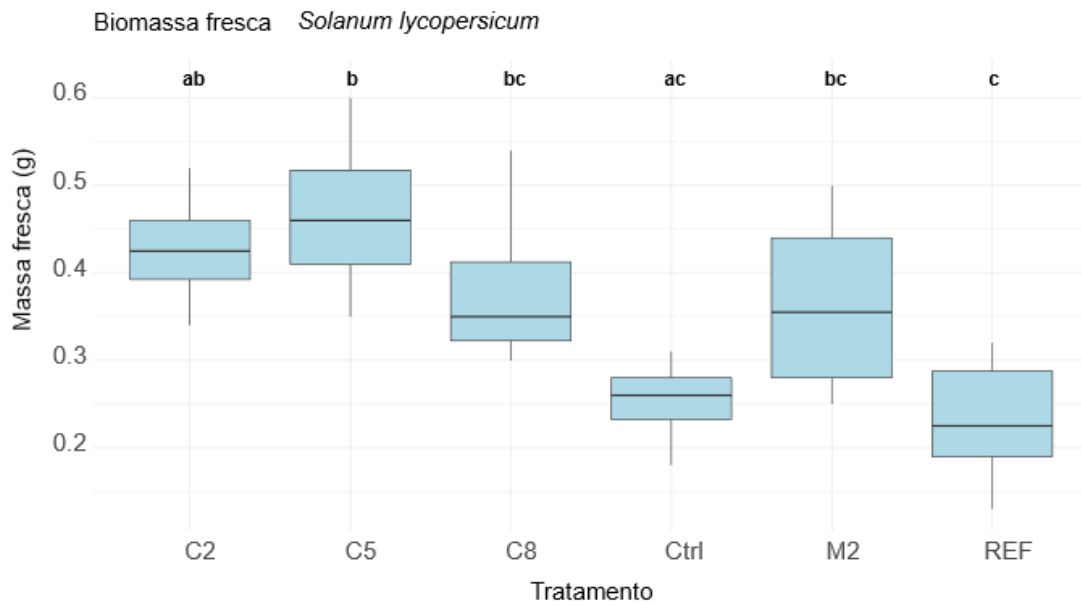
O gráfico intitulado *Germinação de Solanum lycopersicum* em solos com variedade agrícola mostra uma evolução homogênea entre os tratamentos C2, C5, C8 e o controle, com destaque para o leve atraso no tratamento M2. Já no gráfico *Germinação de Solanum lycopersicum em solos nativos*, verifica-se a estabilidade da germinação no REF2 e o decréscimo expressivo no REF 04 ao final do experimento.

5.2.2. Avaliação da Biomassa: Massa Fresca e Massa Seca

A análise de variância para massa fresca mostrou uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos de tratamento ($F(5, 22) = 6.06$, $p = 0.0011$). O teste de Tukey indicou que os tratamentos C2 e C5 tiveram massa fresca significativamente maior que os tratamentos REF ($p = 0.0027$ e $p = 0.0153$, respectivamente). Já as comparações entre C2 e Ctrl, e C5 e Ctrl também apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p = 0.0845$ e $p = 0.0211$, respectivamente). Os demais pares de comparações não mostraram diferenças significativas ($p > 0.1$) (Figura 23). O tratamento REF 04 se destacou com menor massa fresca, enquanto os tratamentos C2 e C5 apresentaram maior massa fresca, significando que esses tratamentos podem ter influenciado positivamente o crescimento das plantas.

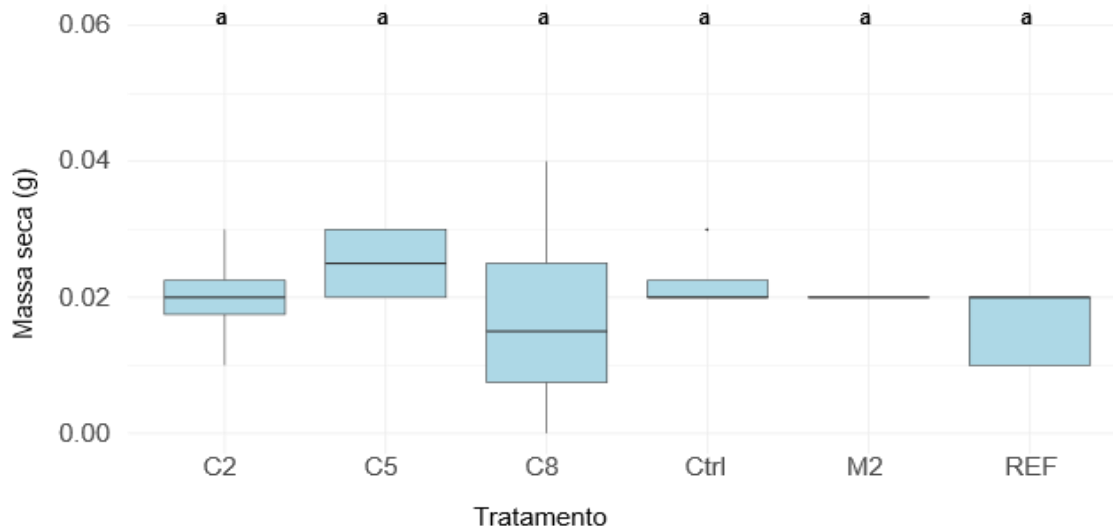
Para massa seca não revelou diferenças significativas entre os tratamentos ($F(5, 22) = 0.79$, $p = 0.566$). O teste de Tukey mostrou que todos os grupos de tratamento (C2, C5, C8, Ctrl, M2, REF 2 e REF 4) apresentaram resultados similares, sem diferenças estatísticas entre eles ($p > 0.5$) (Figura 24). Não houve efeito significativo dos tratamentos sobre a massa seca das plantas, já que todos os grupos mostraram valores semelhantes.

Figura 23 - Massa fresca média (g) de *Solanum lycopersicum* cultivado em diferentes tratamentos de solo agrícola (CTRL, C2, C5, C8, M2 e REF). Os valores refletem o acúmulo de biomassa sob influência de distintos tipos de solo após o período de germinação.



Fonte: Curvina, 2024.

Figura 24 - Massa seca média (g) de *Solanum lycopersicum* cultivado em diferentes tratamentos de solo agrícola (CTRL, C2, C5, C8, M2 e REF). A biomassa seca representa o acúmulo de matéria vegetal isenta de umidade, indicando o desempenho dos tratamentos após o ciclo de germinação.



Fonte: Curvina, 2024.

Foi realizado o teste de Kruskal-Wallis para comparar as diferenças na germinação entre os grupos de tratamento. O teste indicou que houve uma diferença significativa entre os grupos (Kruskal-Wallis chi-squared = 23.451, df = 6, p-value = 0.0006586), sugerindo que pelo menos um dos grupos difere dos outros em termos de germinação.

Após a análise de Kruskal-Wallis, foi realizado o teste de Wilcoxon de comparações múltiplas (Quadro 3) para identificar quais tratamentos apresentavam diferenças significativas. Os p-valores foram ajustados utilizando o método de Benjamin-Hochberg (BH) para controle do erro tipo I em comparações múltiplas.

Quadro 3 - Valores de p obtidos nas comparações múltiplas entre os tratamentos (C2, C5, C8, Ctrl, M2 e REF), referentes à taxa de germinação de *Solanum lycopersicum*. Os valores representam o nível de significância das diferenças entre pares de tratamentos, com destaque para comparações com $p < 0,05$.

Comparação	C2	C5	C8	Ctrl	M2	REF
C5	0,073	-	-	-	-	
C8	0,064	0,073	-	-	-	
Ctrl	0,064	0,073	0,064	-	-	
M2	1,000	0,073	0,064	0,064	-	
REF	0,233	0,064	0,064	0,064	0,233	-

Fonte: Curvina, 2024.

Os resultados das comparações múltiplas mostraram que, embora algumas comparações apresentassem p-valores abaixo de 0.05, não houve diferenças significativas para a maioria das comparações. Os p-valores obtidos para as comparações entre C5 e Ctrl, C8 e Ctrl, e entre C2 e M2 indicaram que as diferenças entre esses grupos não são estatisticamente significativas, uma vez que os p-valores são superiores ao nível de significância de 0.05.

Além disso, comparações envolvendo o grupo REF também apresentaram p-valores elevados, como entre C5 e REF 02, REF 04, indicando que as diferenças entre o grupo REF e os outros tratamentos também não são estatisticamente significativas.

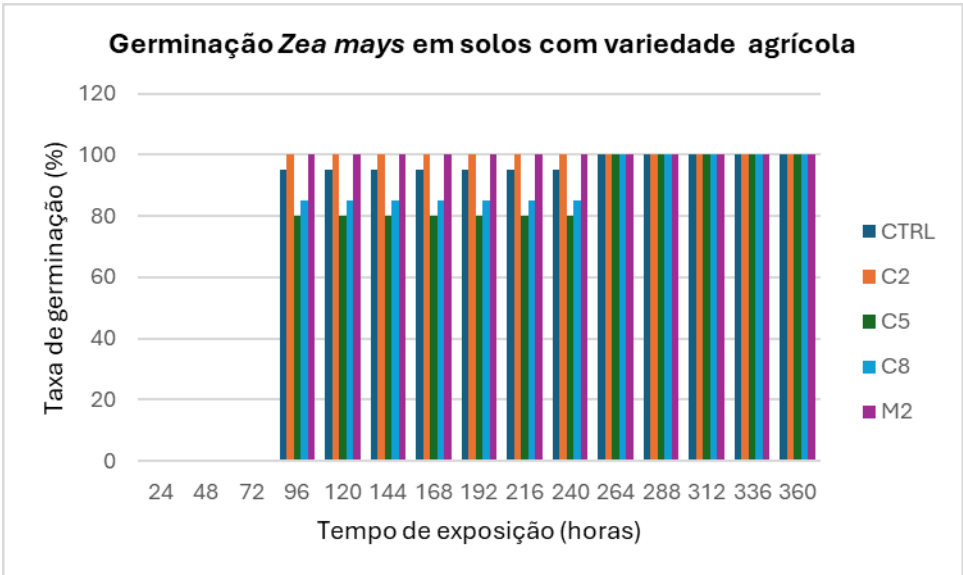
Apesar de alguns p-valores estarem próximos do limite de 0.05, como nas comparações entre C5 e Ctrl, C8 e Ctrl, e C2 e M2, a evidência não foi suficiente para rejeitar a hipótese nula de que não há diferença entre esses grupos. Portanto, podemos concluir que, sob as condições experimentais adotadas, os tratamentos não causaram diferenças significativas na germinação.

Esses resultados sugerem que, embora tenha havido variações nas taxas de germinação entre os diferentes grupos de tratamento, essas diferenças não foram suficientes para serem consideradas estatisticamente significativas. Dessa forma, não podemos afirmar que os tratamentos influenciaram de maneira significativa a germinação dos grupos analisados.

5.2.3. Germinação e Crescimento de *Zea mays* (Milho)

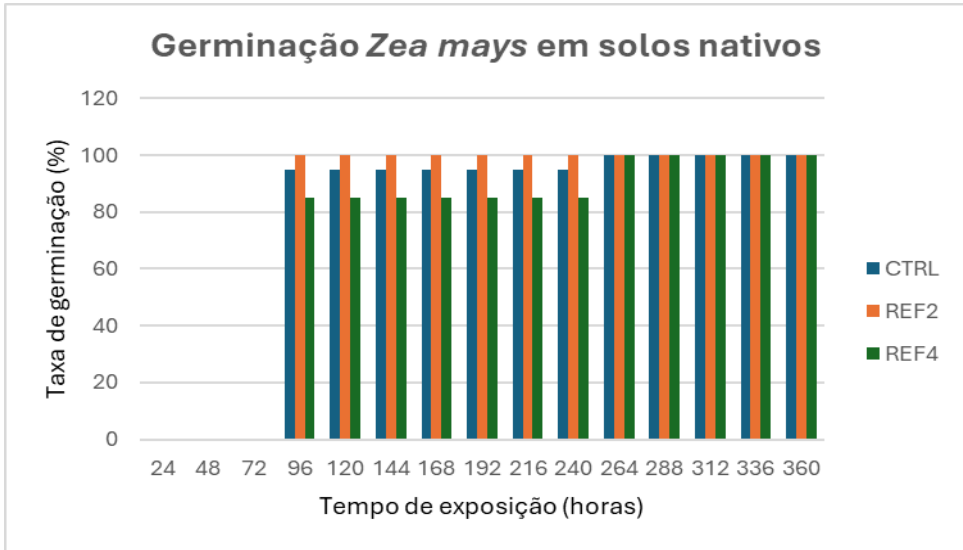
A avaliação da taxa de germinação das sementes de *Zea mays* foi realizada ao longo de 360 horas, com registros periódicos conforme os critérios estabelecidos pelo protocolo OECD 208/2006 – *Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test* (Figura 25 e Figura 26). Esse ensaio tem como objetivo detectar possíveis efeitos adversos de substâncias químicas presentes no solo sobre a emergência e o desenvolvimento inicial de plântulas.

Figura 25 - Germinação de *Zea mays* sob exposição a amostras de solos com variedade agrícola do PSJ/ TO, desenvolvidos durante os anos de 2023/ 2024 no Laboratório de Ecotoxicologia do Campus Palmas- IFTO/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

Figura 26 - Germinação de *Zea mays* sob exposição a amostras de solos nativos do PSJ/ TO, desenvolvidos durante os anos de 2023/ 2024 no Laboratório de Ecotoxicologia do Campus Palmas- IFTO/ Brasil.



Fonte: Curvina, 2024.

A germinação de sementes de *Zea mays* foi avaliada ao longo de 360 horas em diferentes amostras de solo, incluindo solos com uso agrícola (C2, C5, C8, M2), solos de vegetação nativa (REF 02 e REF 04) e o solo controle (CTRL), conforme os critérios definidos pelo protocolo da OECD 208/2006. O objetivo foi identificar possíveis efeitos adversos dos solos sobre a emergência das plântulas.

De modo geral, todos os tratamentos apresentaram início de germinação a partir de 96 horas. A taxa de germinação atingiu valores próximos ou iguais a 100% até 192 horas para a maioria dos tratamentos. Os solos C2, M2, REF 02 e REF 04 apresentaram desempenho semelhante ao solo controle (CTRL), com valores de 100% de germinação desde 120 horas, mantendo-se estáveis até o fim do experimento.

Por outro lado, os tratamentos C5 e C8 apresentaram comportamento germinativo levemente inferior nas primeiras horas de avaliação. Em 120 e 144 horas, ambos apresentaram 85% de germinação, estabilizando apenas após 168 horas. Essa leve defasagem pode estar associada a fatores físico-químicos ou biológicos que, embora não tenham impedido a germinação, possivelmente retardaram o processo inicial de emergência das plântulas.

Os dados gráficos confirmam essas observações. No gráfico “*Germinação de em solos com variedade agrícola*”, observa-se uma leve diferença nas taxas iniciais entre os tratamentos C5 e C8 em comparação aos demais. Já no gráfico “*Germinação de Zea mays em solos nativos*”, observa-se uma resposta uniforme, com germinação rápida e eficiente, inclusive superior à do solo controle em momentos iniciais, como evidenciado pelos 100% de emergência já a partir de 120 horas em REF 02 e REF 04.

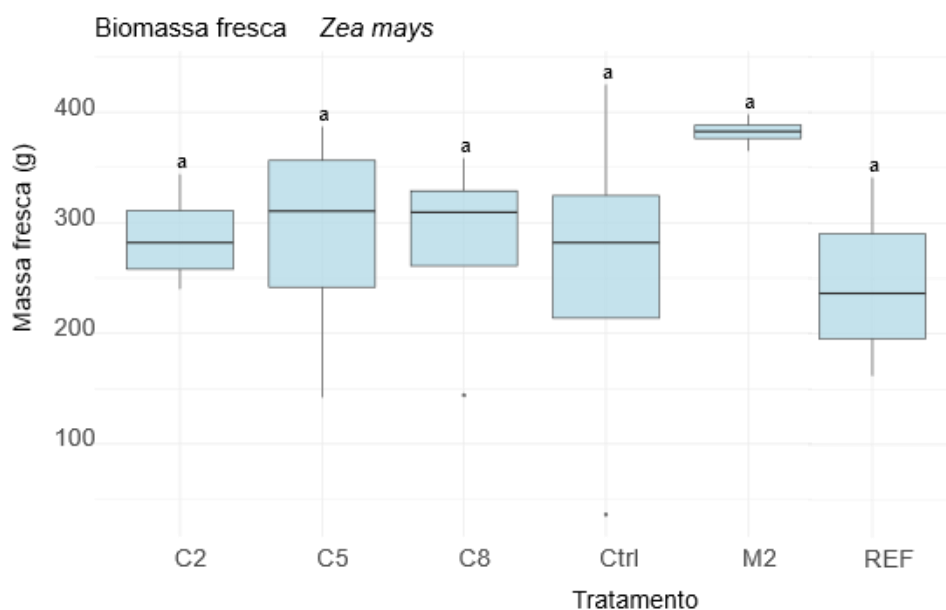
Com base nesses resultados, observa-se que a maioria dos solos não apresentou efeito inibitório significativo sobre a germinação de *Zea mays*. Mesmo os solos agrícolas com desempenho inicial inferior (C5 e C8) apresentaram recuperação ao longo do tempo, com germinação total ao final do experimento.

5.2.4. Avaliação da Biomassa: Massa Fresca e Massa Seca

A análise da biomassa fresca do milho não revelou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos ($F(6, 25) = 1,647$; $p = 0,176$). O teste de Tukey demonstrou que todos os grupos de tratamento apresentaram resultados similares, sem diferenças estatísticas entre eles ($p > 0.05$) (Figura 27). Isso indica que não houve um efeito significativo dos tratamentos sobre o acúmulo de biomassa fresca nas plantas de milho, uma vez que todos os grupos mostraram valores semelhantes.

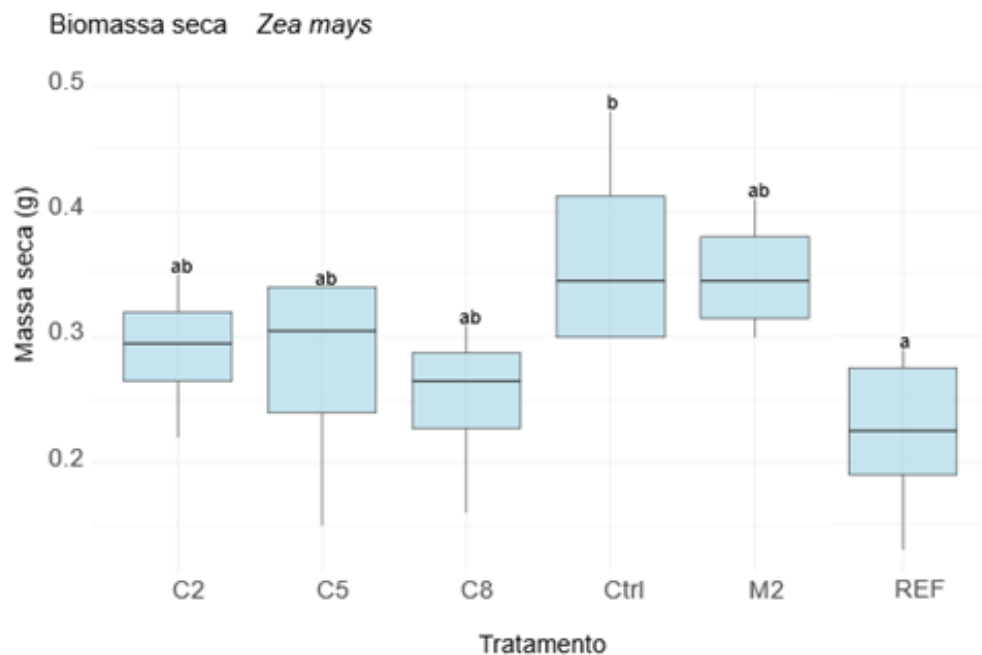
Para a biomassa seca, a análise de variância mostrou uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos de tratamento ($F(6, 25) = 3,187$; $p = 0,018$). O teste de Tukey indicou que o grupo Controle (Ctrl) teve uma biomassa seca significativamente maior que o grupo Referência (REF) ($p = 0,023$). Os demais pares de comparações não mostraram diferenças significativas ($p > 0.05$) (Figura 28). Neste caso, o grupo REF se destacou com a menor média de biomassa seca, enquanto o grupo Controle apresentou o maior acúmulo, sugerindo que este tratamento pode ter influenciado positivamente o desenvolvimento da matéria seca do milho.

Figura 27 - Massa fresca média (g) de *Zea mays* cultivado em diferentes tratamentos de solo agrícola (CTRL, C2, C5, C8, M2 e REF). A biomassa fresca representa o acúmulo de matéria vegetal sob influência dos tratamentos após o período de germinação.



Fonte: Curvina, 2024.

Figura 28 - Massa seca média (g) de *Zea mays* cultivado em diferentes tratamentos de solo agrícola (CTRL, C2, C5, C8, M2 e REF). A biomassa seca indica o acúmulo de matéria vegetal isenta de umidade, refletindo o desempenho dos tratamentos após o desenvolvimento inicial das plantas.



Fonte: Curvina, 2024.

Foi realizado o teste de Kruskal-Wallis para comparar as diferenças na germinação final de milho entre os grupos de tratamento. O teste, no entanto, não indicou uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos ($H(6) = 3,0$; $p = 0,809$), sugerindo que não há evidências de que os tratamentos tenham influenciado a germinação de maneira distinta.

Para as duas culturas, realizamos análises de biomassa fresca e seca para determinar a Concentração Sem Efeito Observado (NOEC) e a Menor Concentração Com Efeito Observado (LOEC). Estas determinações são cruciais para identificar os limiares de efeito de diferentes condições de solo. É importante ressaltar que, neste estudo, as amostras de solo utilizadas são reais, coletadas em campo, e não foram artificialmente contaminadas com concentrações exatas em miligramas de contaminante por quilograma de solo seco (mg/kg). Devido à ausência de um gradiente de concentração exato em mg/kg para os solos tratados (como C2, C8, REF 02, REF 04), não foi possível calcular diretamente valores de Concentração Efetiva. Em vez disso, cada tipo de solo coletado é tratado como um "nível de exposição" ou "tratamento" discreto.

A análise estatística foi realizada através de testes de Dunnett, onde cada grupo

de tratamento (C2, C5, C8, M2, REF 02, REF 04) foi comparado diretamente com o grupo controle (CTRL). Esta comparação é essencial porque o grupo CTRL representa a condição de referência. Ao comparar os tratamentos com este controle, é possível identificar se as condições específicas de cada solo tratado induzem um efeito estatisticamente significativo nas plantas em relação à condição natural/não exposta.

No caso do Milho, ao analisar a biomassa fresca, observou-se que a análise de variância (ANOVA) geral não apresentou significância estatística ($p \geq 0.05$). Isso indica que, em comparação ao controle, não houve evidência estatística de um efeito diferencial causado pelas condições dos solos tratados na biomassa fresca. Consequentemente, a NOEC foi identificada com o tratamento REF 04, representando o maior "nível de exposição" testado no qual nenhum efeito foi estatisticamente detectado em relação ao solo controle. A LOEC não pôde ser determinada, visto que nenhum efeito significativo foi observado em qualquer um dos grupos de tratamento em comparação ao solo controle.

Em contraste, para o milho e sua biomassa seca, a ANOVA geral demonstrou significância estatística ($p < 0.05$), o que justificou a aplicação do teste de Dunnett para comparações múltiplas com o solo controle (Quadro 4). A partir deste teste, o tratamento REF 04 foi identificado como a LOEC, pois foi o primeiro "nível de exposição" (na ordem crescente dos tratamentos) a exibir um efeito estatisticamente significativo na biomassa seca em comparação ao solo controle (com um p-valor ajustado de 0.0256). O grupo REF 02, por sua vez, foi considerado a NOEC, uma vez que representou o último "nível de exposição" sem efeito significativo observado (com p-valor ajustado de 0.0552) em relação ao solo controle antes da identificação da LOEC.

Quadro 4 - Valores de p obtidos na comparação entre os tratamentos de solo (C2, C5, C8, M2, REF_2 e REF_4) e o controle (CTRL), com base nas médias de massa seca de *Zea mays*. Os níveis de significância estão indicados por “**” ($p < 0,05$) e “.” ($p < 0,1$).

Comparação	Valor – p	Significância
C2 - CTRL	0,4221	
C5 - CTRL	0,2618	
C8 - CTRL	0,1028	
M2 - CTRL	0,9983	
REF_2 - CTRL	0,0551	.
REF_4 - CTRL	0,0256	*

Fonte: Curvina, 2024.

Passando para a cultura do tomate, na análise da biomassa fresca, a ANOVA geral também se mostrou significativa ($p < 0.05$), o que permitiu a realização do teste de Dunnett para comparar os diferentes solos com o solo controle (Quadro 5). Neste cenário, o grupo C2 foi determinado como a LOEC, por ser o primeiro "nível de exposição" a apresentar um efeito estatisticamente significativo na biomassa fresca em relação ao solo controle (com p-valor ajustado de 0.0487). Dada essa detecção precoce de efeito, a NOEC foi estabelecida como sendo inferior ao tratamento C2, o que implica que o próprio controle (CTRL) é considerado a NOEC, pois o primeiro "nível de exposição" já demonstrou um efeito significativo.

Quadro 5 - Valores de p obtidos na comparação entre os tratamentos de solo (C2, C5, C8, M2, REF_2 e REF_4) e o controle (CTRL), com base nas médias de massa fresca de *Solanum lycopersicum*. Diferenças estatisticamente significativas estão indicadas por "*" ($p < 0,05$).

Comparação	Valor – p	Significância
C2 - CTRL	0,0487	*
C5 - CTRL	0,0120	*
C8 - CTRL	0,1836	
M2 - CTRL	0,3146	
REF_2 - CTRL	1,0000	
REF_4 - CTRL	0,9922	

Fonte: Curvina, 2024.

Por fim, para o tomate e sua biomassa seca, a ANOVA geral novamente não foi significativa ($p \geq 0.05$), indicando a ausência de um efeito estatístico das condições dos solos tratados sobre a biomassa seca em comparação ao solo controle. Dessa forma, a NOEC foi definida como o grupo REF 04, que corresponde ao maior "nível de exposição" testado sem a observação de um efeito significativo. Assim como na biomassa fresca do milho, a LOEC para a biomassa seca do tomate não pôde ser determinada, dada a ausência de efeitos significativos em relação ao solo controle.

6. DISCUSSÃO

A análise conjunta dos parâmetros físico-químicos e dos ensaios ecotoxicológicos realizados com as espécies *Solanum lycopersicum* e *Zea mays* permitiu compreender com maior profundidade os efeitos potenciais dos diferentes solos testados

sobre o desenvolvimento vegetal. A integração desses dados revelou que, embora os solos apresentem características agronomicamente distintas especialmente no que tange à fertilidade, acidez, textura e teor de matéria orgânica, a resposta biológica das espécies vegetais não segue necessariamente um padrão linear baseado apenas nesses atributos (Costa *et al.*, 2014).

O solo M2, por exemplo, demonstrou elevado potencial produtivo do ponto de vista físico-químico, com CTC total de 6,26 cmolc/dm³, elevada saturação por bases (66,46%) e o maior teor de matéria orgânica entre todas as amostras analisadas. No entanto, esse solo apresentou atraso na germinação do tomate, sugerindo a possível presença de compostos fitotóxicos ou interações químicas não detectadas por análises laboratoriais convencionais (Rosado *et al.*, 2009). Esse resultado reforça a importância dos bioindicadores vegetais como ferramentas sensíveis à presença de contaminantes de baixa concentração ou de efeitos subletais cumulativos (Arias *et al.*, 2007).

Os solos de referência (REF 02 e REF 04), utilizados como controles ambientais de vegetação nativa, apresentaram desempenho inferior nos parâmetros físico-químicos especialmente altos teores de alumínio trocável (>2,8 cmolc/dm³), saturação por alumínio acima de 85% e baixa CTC, o que corrobora seu caráter naturalmente ácido e pobre em nutrientes. O solo REF 04, em particular, comprometeu significativamente o desempenho do tomate e do milho, especialmente nas variáveis relacionadas à biomassa seca, o que indica que mesmo áreas naturais podem representar riscos edáficos à germinação e ao crescimento vegetal, dependendo de sua composição (Luo *et al.*, 2024).

Em contraste, os solos C2 e C5, mesmo com limitações como baixa CTC ou textura arenosa, favoreceram o acúmulo de biomassa fresca no tomate. Essa resposta positiva pode estar relacionada à maior disponibilidade imediata de nutrientes ou à baixa presença de contaminantes orgânicos persistentes. Ainda que a germinação não tenha apresentado diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, a massa fresca mostrou sensibilidade a essas variações, sugerindo que os efeitos ecotoxicológicos são mais evidentes na fase inicial de crescimento do que na emergência das plântulas (Das; Alam, 2024).

Para o milho, os dados apontam para uma resistência maior aos efeitos iniciais dos solos testados. A germinação de *Zea mays* manteve-se uniforme entre os tratamentos, evidenciando menor sensibilidade às possíveis alterações edáficas. No

entanto, a biomassa seca apresentou variações significativas, com destaque negativo para o solo REF 04, que comprometeu o acúmulo de matéria estrutural. Esses dados sugerem que os efeitos ecotoxicológicos, mesmo que não inibam a germinação, podem se manifestar de forma crônica, interferindo no metabolismo e na alocação de biomassa ao longo do tempo (Khaeim *et al.*, 2022; Wyszowska *et al.*, 2024).

De forma geral, os resultados indicam que os efeitos dos solos sobre as espécies vegetais testadas são modulados por um conjunto de fatores que vai além da fertilidade química convencional. Textura, teor de matéria orgânica, acidez, disponibilidade de nutrientes e, sobretudo, a presença de contaminantes ou desequilíbrios iônicos podem interagir de maneira complexa, gerando respostas biológicas distintas. A variação entre as espécies também foi evidente: o tomate mostrou-se mais sensível na fase inicial (massa fresca), enquanto o milho demonstrou reações mais marcantes no acúmulo de biomassa seca o que evidencia a importância de se adotar uma abordagem multiespécie na avaliação de riscos ecotoxicológicos (Adekiya *et al.*, 2018; Ousansafi *et al.*, 2019).

Essas constatações reforçam a relevância de se aplicar análises ecotoxicológicas complementares à caracterização físico-química tradicional. Somente a união de métodos permite uma avaliação mais robusta da qualidade ambiental dos solos, especialmente em contextos agrícolas onde há risco potencial de acúmulo de compostos tóxicos, como agrotóxicos, metais pesados ou resíduos orgânicos. Além disso, os resultados obtidos sugerem que medidas corretivas como calagem, adubação orgânica e conservação da cobertura vegetal são estratégias essenciais para a mitigação de riscos e a melhoria da aptidão agrícola das áreas estudadas (Feng; Cheng, 2023; Katebe *et al.*, 2024).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa possibilitou uma análise abrangente da qualidade ambiental de solos utilizados na agricultura irrigada e em áreas de vegetação nativa, por meio da integração entre dados físico-químicos e ecotoxicológicos. A abordagem multidisciplinar adotada, fundamentada no protocolo da OECD 208/2006 e nos métodos da Embrapa (Teixeira *et al.*, 2017), demonstrou ser eficaz na detecção de efeitos adversos à germinação e ao desenvolvimento de espécies vegetais bioindicadoras, mesmo em solos com aparente equilíbrio químico.

A caracterização físico-química revelou que os solos agrícolas avaliados apresentaram variabilidade significativa quanto à fertilidade, à acidez, à capacidade de troca catiônica e ao teor de matéria orgânica. O solo M2 destacou-se com as melhores condições químicas e estruturais, mas apresentou resposta negativa na germinação do tomate, o que evidenciou que parâmetros laboratoriais tradicionais não são, por si só, suficientes para garantir a ausência de efeitos tóxicos. Por sua vez, os solos REF 02 e REF 04, utilizados como áreas de referência, demonstraram baixa fertilidade natural e, no caso do REF 04, interferência negativa na biomassa seca de milho e na germinação de tomate, indicando que até mesmo ambientes naturais podem oferecer limitações ecotoxicológicas relevantes.

Os resultados ecotoxicológicos com *Solanum lycopersicum* evidenciaram sensibilidade especialmente na fase de crescimento inicial, com destaque para os tratamentos C2 e C5, que favoreceram o acúmulo de biomassa fresca. Para *Zea mays*, observou-se menor variação na germinação entre os tratamentos, mas uma diferença significativa na biomassa seca, especialmente entre o solo controle e o REF 04. Esses achados indicam que os efeitos dos solos sobre o desenvolvimento das plantas são espécie-dependentes e podem variar ao longo do ciclo de crescimento.

Diante desses resultados, conclui-se que a avaliação da qualidade do solo deve ir além dos indicadores físico-químicos tradicionais. A inclusão de testes ecotoxicológicos com organismos vegetais permite detectar efeitos subletais que comprometeriam, a longo prazo, a produtividade agrícola e a integridade ecológica das áreas cultivadas. Essa abordagem integrada é essencial para subsidiar ações de manejo sustentável, recuperação de áreas degradadas e para a escolha consciente de solos aptos à agricultura de base ecológica.

Recomenda-se, para estudos futuros, a ampliação dos parâmetros biológicos avaliados, incluindo indicadores microbiológicos e enzimáticos, bem como a quantificação de contaminantes emergentes como pesticidas, metais pesados e resíduos orgânicos persistentes. Tais medidas contribuirão para o aprimoramento dos diagnósticos ambientais e para a construção de políticas públicas voltadas à conservação e ao uso racional do solo.

REFERÊNCIAS

- ADEKIYA, A. *et al.* Heavy metal composition of maize and tomato grown on contaminated soils. **Open Agriculture**, v. 3, p. 414-426, 2018.
- AGUIAR, L. L.; ANDRADE-VIEIRA, L. F.; OLIVEIRA DAVID, J. A. DE. Evaluation of the toxic potential of coffee wastewater on seeds, roots and meristematic cells of *Lactuca sativa* L. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 133, p. 366–372, 1 nov. 2016.
- AKBAR, Z. *et al.* Comparative effects of organic and inorganic amendments on heavy metal co-contaminated soil remediation, reducing heavy metal bioavailability and enhancing nutrient accessibility for maize growth. **Land Degradation and Development**, 1 out. 2024.
- AKIO, Y.; TSUKASA, H. Sustainability of Irrigation Fruit Farming in Terms of Water Supply-demand Situation: Case Study of the Middle Basin of São Francisco River, Northeast Brazil. **Geographical Review of Japan Series B**, v. 94, n. 1, p. 1–17, 2021.
- ALENGEBAWY, A. *et al.* Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. **Toxics**, v. 9, n. 3, p. 1–34, 1 mar. 2021.
- ALI, H.; KHAN, E.; SAJAD, M. A. Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications. **Chemosphere**, v. 91, n. 7, p. 869–881, 2013.
- ALZHRANI, Y.; ABDULBAKI, A. S.; ALSAMADANY, H. Genotypic variability in stress responses of *Sorghum bicolor* under drought and salinity conditions. **Frontiers in Genetics**, v. 15, 2024.
- AMBIENTAL. MATO LOGiA, p. 450. In.: Matologia: estudos sobre plantas daninhas / Arthur Arrobas Martins Barroso (Organizador); Afonso Takao Murata (Organizador). - Jaboticabal: Fábrica da Palavra, 2021.
- AN, J. *et al.* Ecotoxicological effects of typical personal care products on seed germination and seedling development of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Chemosphere**, v. 76, n. 10, p. 1428–1434, 2009.
- ANGULO, M. G.; BATISTA, M. T.; CAICEDO, M. I. G. Advances and Challenges of a Circular Economy (CE) in Agriculture in Ibero-America: A Bibliometric Perspective. **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 24, 1 dez. 2024.
- ANJARIA, P.; VAGHELA, S. Toxicity of agrochemicals: Impact on environment and human health. **Journal of Toxicology**, v. 2024, n. 1, p. 250, 2024.
- ARIAS, A. R. L. *et al.* Utilização de bioindicadores na avaliação de impacto e no monitoramento da contaminação de rios e córregos por agrotóxicos. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 61-72, jan./mar. 2007.

ARINZECHI, C. *et al.* Synergistic mitigation of cadmium stress in rice (*Oryza sativa* L.) through combined selenium, calcium, and magnesium supplementation.

Environmental Geochemistry and Health, v. 46, n. 11, 1 nov. 2024.

ASTM, American Society for Testing and Materials. 2002 Standard guide for conducting acute toxicity tests on test materials with fishes, macroinvertebrates, and amphibians. Annual book of ASTM standards (vol. 11.05.)

ATTA, M. I. *et al.* Assessing the effect of heavy metals on maize (*Zea mays* L.) growth and soil characteristics: plants-implications for phytoremediation. **PeerJ**, v. 11, 2023.

AZEVEDO, F.D.; CHASIN, A.D.M. As Bases Toxicológicas da Ecotoxicologia. São Carlos-SP: Rima, 2004.

BAIARDI, A.; CLOTILDE MEIRELLES RIBEIRO, M. Efficiency of irrigate agriculture management in the São Francisco Valley: a comparative analysis into the Petrolina-Juazeiro regional hub. **Colóquio - Revista de desenvolvimento regional**, v. 20 n.3, jun. 2023.

BAIRD, C. Environmental Chemistry. Eds. W. H. Freeman and Company, 2 nd edition, New York BONADA, N.; PRAT, N.; RESH, V. H. & STATZNER, B. 2006. Developments in aquatic insect biomonitoring: a comparative analysis of recent approaches. Annual Review of Entomology 51:495-523. 1999.

BATHAEI, A.; ŠTREIMIKIENĖ, D. **A Systematic Review of Agricultural Sustainability Indicators Agriculture (Switzerland)** MDPI, , 1 fev. 2023.

BEKETOV, M. A. *et al.* Pesticides reduce regional biodiversity of stream invertebrates. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 110, n. 27, p. 11039–11043, 2 jul. 2013.

BELLINGERI, A. *et al.* Preliminary assessment of environmental safety (ecosafety) of dextrin-based nanosponges for environmental applications. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 273, 15 mar. 2024.

BERTOLETTI, E. Controle ecotoxicológico de efluentes líquidos no estado de São Paulo. CETESB, 2. ed. 2013.

BIERKENS, J. *et al.* Comparative sensitivity of 20 bioassays for soil quality. **Chemosphere**, v. 37, n. 14–15, p. 2935–2947, dez. 1998.

BROOKS, A. C. *et al.* Historical control data for the interpretation of ecotoxicity data: are we missing a trick? **Ecotoxicology**, v. 28, n. 10, p. 1198–1209, 1 dez. 2019.

NIVA, C. C.; BROWN, G. G. (Org.). **Ecotoxicologia Terrestre: Métodos e Aplicações dos Ensaio com Oligoquetas**. Brasília, DF: Embrapa, 2019.

BURALLI, R. J. *et al.* Respiratory condition of family farmers exposed to pesticides in

the state of Rio de Janeiro, Brazil. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 6, 8 jun. 2018.

CAO, Q. *et al.* Wheat phytotoxicity from arsenic and cadmium separately and together in solution culture and in a calcareous soil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 148, n. 1–2, p. 377–382, 5 set. 2007.

CEGER, P. *et al.* Current ecotoxicity testing needs among selected U.S. federal agencies. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 133, 1 ago. 2022.

CHAPMAN, P. M.; FAIRBROTHER, A.; BROWN, D. A critical evaluation of safety (uncertainty) factors for ecological risk assessment. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 17, n. 1, p. 99–108, 1998.

CHAUDHARY, C. *et al.* Evaluation of herbicide efficacy and combinations for weed management in non-crop situations. **International Journal of Research in Agronomy**, v. 7, n. 12S, p. 683–686, 1 dez. 2024.

COLLIN, S. *et al.* Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects in plants: A review. **Journal of Hazardous Materials Letters**, v. 3, 1 nov. 2022.

CONKLIN, P. A. *et al.* On the mechanisms of development in monocot and eudicot leaves. **New Phytologist**, v. 221, n. 2, p. 706–724, 1 jan. 2019.

COSTA, D. P. P. *et al.* Avaliação físico-química e ecotoxicológica de efluentes provenientes de estações de tratamento de esgoto. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aquidabã, v. 5, n. 1, p. 27-40, dez. 2013/maio 2014.

CRUZ, J. M. *et al.* Toxicity Assessment of Contaminated Soil Using Seeds as Bioindicators. **Journal of Applied Biotechnology**, v. 1, n. 1, 1 maio 2013.

CUNHA NETO, A. R. DA *et al.* Changes in Chromosome Complement and Germination of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Exposed to Heavy Metal Stress. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 234, n. 4, 1 abr. 2023.

DA CRUZ, C. *et al.* ECOTOXICOLOGIA DOS HERBICIDAS: APLICAÇÕES E DINÂMICA *Daphnia magna*: an alternative to mammals in the prescreening of chemical toxicity? **Ecotox Environ Safe**. 38:292-295. 2000.

DAS, E. J.; ALAM, A. K. M. R. Effects of microplastics polluted soil on the growth of *Solanum lycopersicum* L. **Environmental Systems Research**, v. 13, n. 36, 2024.

DEGUINE, J.-P. *et al.* Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 41, art. 38, 2021.

DENORA, M. *et al.* Uptake and accumulation of emerging contaminants in processing tomato irrigated with tertiary treated wastewater effluent: a pilot-scale study. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023.

DEVECI OZKAN, A.; AKSOY, O. Determination of Pesticide-Induced Genotoxicity on

Soybean (*Glycine max* L.). **Commagene Journal of Biology**, v. 3, n. 2, p. 83–87, 20 dez. 2019.

DUBEY, A. *et al.* Ecological impacts of pesticide seed treatments on arthropod communities in a grain crop rotation. **Journal of Applied Ecology**, v. 57, n. 5, p. 936–951, 1 maio 2020.

ELUMALAI, P. *et al.* Agrochemical pollution: A serious threat to environmental health. **Current Opinion in Environmental Science and Health**, v. 43, 1 fev. 2025.

EMMANOUIL, C.; GIANNAKIS, I.; KYZAS, G. Z. Terrestrial bioassays for assessing the biochemical and toxicological impact of biosolids application derived from wastewater treatment plants. **Science of the Total Environment**, v. 931, 25 jun. 2024.

FAGUNDES, M.; CAMARGOS, M. G.; COSTA, F. V. DA. A qualidade do solo afeta a germinação das sementes e o desenvolvimento das plântulas de *Dimorphandra mollis* Benth. (Leguminosae: Mimosoideae). **Acta Botanica Brasilica**, v. 25, n. 4, p. 908–915, dez. 2011.

FELLMANN, S. *et al.* Reproducibility, reliability, and regulatory relevance of plant visual injury assessments. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 20, n. 4, p. 915–923, 1 jul. 2024.

FENG, H.; CHENG, J. Whole-Process Risk Management of Soil Amendments for Remediation of Heavy Metals in Agricultural Soil A Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, art. 1869, 2023.

FIORE, V. *et al.* The socio-economic issues of agroecology: a scoping review. **Agricultural and Food Economics**, v. 12, n. 1, 1 dez. 2024.

FREITAS, J.; SILVA, P. Sustainable Agricultural Systems for Fruit Orchards: The Influence of Plant Growth Promoting Bacteria on the Soil Biodiversity and Nutrient Management. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 21, 1 nov. 2022.

FUCK, M. P.; BEATRIZ, M.; BONACELLI, M. Institutions and Technological Learning: Public-Private Linkages in Agricultural Research in Brazil and Argentina. **J. Technol. Manag. Innov.**, v. 4, n. 2, 2009.

GARG, A. *et al.* Improving the assessment of polluted sites using an integrated bio-physico-chemical monitoring framework. **Chemosphere**, v. 290, 1 mar. 2022.

GARRALAGA, M. P. *et al.* Key Properties for the Toxicity Classification of Chemicals: A Comparison of the REACH Regulation and Scientific Studies Trends. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 12, n. 22, 1 nov. 2022.

GHEYI, H. R. *et al.* Management and reclamation of salt-affected soils: general assessment and experiences in the Brazilian semiarid region. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 53, 2022.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 909–930, dez. 2010.

GOLAN, K. *et al.* Approaches to Integrated Pest Management in Orchards: Comstockaspis pernicios (Comstock) Case Study. **Agriculture (Switzerland)**, v. 13, n. 1, 1 jan. 2023.

GONG, P. *et al.* Evaluation and refinement of a continuous seed germination and early seedling growth test for the use in the ecotoxicological assessment of soils. **Chemosphere**, v. 44, n. 3, p. 491–500, jul. 2001.

GRECCO, K. D. *et al.* Toxicogenetic, biochemical, and physiological effects of azoxystrobin and carbendazim fungicides over *Lactuca sativa* L. and *Phaseolus vulgaris* L. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 31, p. 44036–44048, 1 jul. 2024.

GUILHERME, L. R. G.; LOPES, A. S.; CORGUINHA, A. P. Challenges and opportunities for a sustainable agriculture in Brazil. **Acta Horticulturae**, v. 1224, p. 1–6, 2018.

GUILHERMINO, L., DIAMANTINO T.C., SILVA, M.C., SOARES, A.M.V.M. Acute toxicity test with *Daphnia magna*: an alternative to mammals in the prescreening of chemical toxicity? **Ecotoxicol Environ Saf.** 46(3):357-62, 2000.

HAGEL, H. *et al.* Socio-economic aspects of irrigation agriculture as livelihood for rural families in Brazil's semi-arid northeast. **Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics**, v. 120, n. 2, p. 157–169, 2019.

HELANDER, M. *et al.* Glyphosate residues in soil affect crop plant germination and growth. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 1 dez. 2019.

HELFAND, S. M.; RADA, N. E.; MAGALHÃES, M. M. L'agriculture brésilienne : s'agit-il uniquement de grandes exploitations? **EuroChoices**, v. 16, n. 1, p. 17–22, 1 abr. 2017.

HOFFMAN, D., RATTNER, B., CAIRS, J. Aquatic Toxicology Test Methods. In: Handbook of Ecotoxicology – Environ Chem Toxicol. W.J. Adams e C.D. Rowland (eds.), 2 nd edition, Lewis Publishers.USA. 2003.

HOLLERT, H., ERNST, M., SEILER, T. *et al.* Strategien zur Sedimentbewertung – ein Überblick. *Environ SciEur* 21, 160–176 (2009). Disponível em <https://doi.org/10.1007/s12302-009-0045-5>.

JALLI, M. *et al.* Effects of Crop Rotation on Spring Wheat Yield and Pest Occurrence in Different Tillage Systems: A Multi-Year Experiment in Finnish Growing Conditions. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, 5 jul. 2021.

JANG, M. *et al.* Ecotoxicity assessment of additives in commercial biodegradable plastic products: Implications for sustainability and environmental risk. **Science of**

the Total Environment, v. 931, 25 jun. 2024.

KALINHOFF, C.; CALDERÓN, N. T. Mercury Phytotoxicity and Tolerance in Three Wild Plants during Germination and Seedling Development. **Plants**, v. 11, n. 15, 1 ago. 2022.

KLAASSEN, C. D. Cassaret & Doull's Toxicology: The basic science of poisons. 6 th edition. McGraw-Hill, USA. 2001.

KATEBE, F. *et al.* Application of soil amendments to reduce the transfer of trace metal elements from contaminated soils of Lubumbashi (Democratic Republic of the Congo) to vegetables. **Environ Monit Assess**, v. 196, art. 902, 2024.

KHAEIM, H. *et al.* Impact of Temperature and Water on Seed Germination and Seedling Growth of Maize (*Zea mays* L.). **Agronomy**, v. 12, art. 397, 2022.

KLEKOTKA, U. *et al.* Ecotoxicological assessment of magnetite and magnetite/Ag nanoparticles on terrestrial and aquatic biota from different trophic levels. **Chemosphere**, v. 308, 1 dez. 2022.

LATIF, M., LICEK, E. Toxicity assessment of wastewaters, river waters, and sediments in Austria using cost-effective microbiotests. *Environ Toxicol* 19:302- 309. 2004.

LEONEL, S. *et al.* Sustainable Management of Frutis Orchards Using Organic Matter and Cover Crops: A Case Study from Brazil. **Soil Fertility Improvement and Integrated Nutrient Management - A Global Perspective**, 24 fev. 2012.

LINÉ, C. *et al.* Comparative study of response of four crop species exposed to carbon nanotube contamination in soil. **Chemosphere**, v. 274, p. 129854, 1 jul. 2021.

LIU, C. *et al.* Response of Soil Microenvironment and Crop Growth to Cyclic Irrigation Using Reclaimed Water and Brackish Water. **Plants**, v. 12, n. 12, 1 jun. 2023.

LIU, M.; ZHOU, T.; FU, Q. Leaf nitrogen and phosphorus are more sensitive to environmental factors in dicots than in monocots, globally. **Plant Diversity**, 1 nov. 2024.

LUO, C. *et al.* Environmental risk substances in soil on seed germination: Chemical species, inhibition performance, and mechanisms. **Journal of Hazardous Materials**, v. 472, 5 jul. 2024.

LUO, Y. *et al.* Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects. **Waste Management**, v. 71, p. 109–114, 1 jan. 2018.

MADEJÓN, P. *et al.* Effects of soil contamination by trace elements on white poplar progeny: seed germination and seedling vigour. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, n. 11, 1 nov. 2015.

MAHAR, A. *et al.* Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.

126, p. 111–121, 1 abr. 2016.

MAIA, N. B.; MARTOS, H. L.; BARRELLA, W. Indicadores ambientais: conceitos e aplicações. São Paulo:EDUC – PUC-SP, 2001, 285p.

MARINHO COSTA, F.; VIRGÍLIO, A.; BASTOS, B. Transformações em organizações de fruticultura irrigada e a dinâmica do comprometimento organizacional. **REAd | Revista Eletrônica de Administração**, Porto Alegre, Ed. 76, n. 3, p. 675-708, set./dez. 2013.

MARTIN-CLOSAS, L.; BOTET, R.; PELACHO, A. M. An in vitro crop plant ecotoxicity test for agricultural Bioplastic constituents. **Polymer Degradation and Stability**, v. 108, p. 250–256, 1 out. 2014.

MCKAY, B. M.; NEHRING, R.; CATACORA-VARGAS, G. The political economy of agroecological transitions: key analytical dimensions. **Journal of Peasant Studies**, 2024.

MENDES DA SILVA, L.; ANDRADE–VIEIRA, L. F. Ecotoxicological bioassays with terrestrial plants: a holistic view of standards, guidelines, and protocols. **Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B: Critical Reviews**, 2025.

methods of measurement—an important line of evidence in the environmental risk framework. *Integrated Environmental Assessment and Management* 3: 268–274. 2007.

MITCHELL, R. L. *et al.* Effects of environmentally hazardous chemicals on the emergence and early growth of selected Australian plants. **Plant and Soil**, v. 112, p. 195–199, 1988.

MITELUT, A.; POPA, M. E.; MITELUT, A. C. Seed germination bioassay for toxicity evaluation of different composting biodegradable materials. **Romanian Biotechnological Letters**, v. 16, n. 1, 2011.

MOŽDŽENÍ, K. *et al.* Effect of sorbent additives to copper-contaminated soils on seed germination and early growth of grass seedlings. **Molecules**, v. 26, n. 18, 1 set. 2021.

MURIITHI, B. W. *et al.* Impact of integrating pest and pollinator management training on knowledge, perceptions, and livelihoods of avocado farmers in Kenya. **Journal of Integrated Pest Management**, v. 15, n. 1, 2024.

NAGAJYOTI, P. C.; LEE, K. D.; SREEKANTH, T. V. M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 8, n. 3, p. 199–216, 2010.

NANDILLON, R.; GUINET, M.; MUNIER-JOLAIN, N. Crop management strategy redesign enables a reduction in reliance on pesticides: A diachronic approach based on a diversity of French commercial farms. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 366, 1 jun. 2024.

NELEMANS, J. B. *et al.* Effects of the herbicide metsulfuron-methyl on a plant community, including seed germination success in the F1 generation. **Frontiers in Environmental Science**, v. 5, n. MAR, 28 mar. 2017.

NOGUEIRA CARDOSO, E. J. B.; LOPES ALVES, P. R. Soil Ecotoxicology. **Ecotoxicology**, 3 fev. 2012.

NOGUEIRA, L. *et al.* Phytotoxicity of petroleum-contaminated soil and bioremediated soil on *Allophylus edulis*. **Rodriguésia**, v. 62, n. 3, p. 459–466, set. 2011.

NOGUEIRA, R. F. PUPO; TORRES, J. P. M. Comentário sobre a revisão " DDT: toxicidade e contaminação". **Química Nova**, v. 26, p. 147-147, 2003.

NOWACKA, A. *et al.* Comprehensive Ecotoxicity Studies on Quaternary Ammonium Salts Synthesized from Vitamin B3 Supported by QSAR Calculations. **Plants**, v. 12, n. 4, 1 fev. 2023.

OECD, Guideline for testing of chemicals: *Lemna* sp. Growth inhibition test. Organization for economic cooperation and development. 2002.

OECD. Test No. 208: Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, OECD Publishing, Paris, Disponível em <https://doi.org/10.1787/9789264070066-en>. 2006.

OHE, T., WATANABE, T., WAKABAYASHI, K. Mutagens in surface waters: a review. *Mutat. Res.* 567: 109-149. 2004.

OUANSAFI, S. *et al.* The effects of soil properties on the yield and the growth of tomato plants and fruits irrigated by treated wastewater. **AIMS Agriculture and Food**, v. 4, n. 4, p. 921-938, 2019.

PAIVA, C. M. N. *et al.* Pathways to Rural Sustainability: Opportunities and Challenges in the Creation of an Agrotechnological District in Ingaí City, Brazil. **Agriculture (Switzerland)**, v. 14, n. 12, 1 dez. 2024.

PARAMESWARI, E. *et al.* Sustainable management of mixed soil contaminants through integrated biosystems: Efficacy of biochar and humic acid amendments in marigold phytoremediation. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 197, n. 4, 1 abr. 2025.

PARERA, V.; PARERA, C. A.; FERESIN, G. E. Germination and Early Seedling Growth of High Andean Native Plants under Heavy Metal Stress. **Diversity**, v. 15, n. 7, 1 jul. 2023.

PEDUTO, T. A. G.; JESUS, T. A. DE; KOHATSU, M. Y. Sensibilidade de diferentes sementes em ensaio de fitotoxicidade. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, v. 4, n. 2, p. 200, 30 set. 2019.

PERICO, C.; TAN, S.; LANGDALE, J. A. Developmental regulation of leaf venation

patterns: monocot versus eudicots and the role of auxin. **New Phytologist**, v. 234, n. 3, p. 783–803, 1 maio 2022.

PESSOA, L. G. M. *et al.* Assessment of soil salinity status under different land-use conditions in the semiarid region of Northeastern Brazil. **Ecological Indicators**, v. 141, 1 ago. 2022.

PILON-SMITS, E. Phytoremediation. **Annual Review of Plant Biology**, v. 56, p. 15–39, 2005.

PIRŠELOVÁ, B. *et al.* Biochemical and physiological comparison of heavy metal-triggered defense responses in the monocot maize and dicot soybean roots.

Molecular Biology Reports, v. 38, n. 5, p. 3437–3446, 2011.

PODDAR, K. *et al.* Mitigation of hydrocarbon toxicity using bacterial consortium in microcosm environment for agrarian fecundity. **Environmental Research**, v. 237, 15 nov. 2023.

POTASHEV, K.; SHARONOVA, N.; BREUS, I. The use of cluster analysis for plant grouping by their tolerance to soil contamination with hydrocarbons at the germination stage. **Science of the Total Environment**, v. 485–486, n. 1, p. 71–82, 1 jul. 2014.

RELYEA, R. A. The lethal impact of roundup on aquatic and terrestrial amphibians. **Communications Ecological Applications**, v. 15, n. 4, p. 1118–1124, 2005.

RENFORS, S. M. Education for the circular economy in higher education: an overview of the current state. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 25, n. 9, p. 111–127, 2024.

RICHTER, E. *et al.* Results of extended plant tests using more realistic exposure scenarios for improving environmental risk assessment of veterinary pharmaceuticals. **Environmental Sciences Europe**, v. 28, n. 1, 1 dez. 2016.

ROGACZ, D. *et al.* Effect of new thiophene-derived aminophosphonic derivatives on growth of terrestrial plants. Part 2. Their ecotoxicological impact and phytotoxicity test toward herbicidal application in agriculture. **Molecules**, v. 23, n. 12, 1 dez. 2018.

ROSADO, L. D. S. *et al.* Alelopatia do extrato aquoso e do óleo essencial de folhas do manjeriço "Maria Bonita" na germinação de alface, tomate e melissa. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v. 11, n. 4, p. 422–428, 2009.

SAHA, L.; BAUDDH, K. Assessment of phytotoxicity bioassay and metal accumulation potential of *Ricinus communis* L. genotypes during cultivation in iron mine soil of Jharkhand, India. **Bioremediation Journal**, 2024.

SALAZAR M.H., ST-JEAN S.D. Review of aquatic in situ approaches for stressor and effect diagnosis. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 3: 234–245. 2007.

SANTOS BARBOSA, G. DOS; LIMA, J. R. F. DE; FERREIRA, M. DE O. Tipificação

de produtores por nível de inovação: análise na fruticultura do vale do São Francisco. **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 18, n. 3, p. 1–21, 1 jul. 2021.

SEN, L. T. H. *et al.* The Opportunities and Barriers in Developing Interactive Digital Extension Services for Smallholder Farmers as a Pathway to Sustainable Agriculture: A Systematic Review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 17, n. 7, 1 abr. 2025.

SHARMA, P.; DUBEY, R. S. Lead toxicity in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, n. 1, p. 35–52, mar. 2005.

SILVA LEÓN, P. M. *et al.* The Impact of Variability in Fertilizer Prices on Farmers' Profitability: An Interdisciplinary Perspective. **Journal of Educational and Social Research**, v. 15, n. 1, p. 183–197, 1 jan. 2025.

SILVÉRIO, A. C. P. *et al.* Assessment of Primary Health Care for rural workers exposed to pesticides. **Revista de Saude Publica**, v. 54, 2020.

Soares, A. M. V. M. Clonal variation in life-history traits in *Daphnia magna* Straus (Crustacea, Cladocera). Implications for ecotoxicology. Tese de Doutorado. Department of animal and Plant Sciences, University of Sheffield. pp 162. 1989.

SOLTIS, P. S.; SOLTIS, D. E. The origin and diversification of angiosperms. **American Journal of Botany**, v. 91, n. 10, p. 1614–1626, out. 2004.

STAVELEY, J. P. *et al.* Variability in Nontarget Terrestrial Plant Studies Should Inform Endpoint Selection. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 14, n. 5, p. 639–648, 1 set. 2018.

STELZER, C. P. Loss of Sexual Reproduction and Dwarfing in a Small Metazoan. **PLoS ONE** 5(9): e12854. USEPA (US Environmental Protection Agency). Principles of Environmental Impact Assessment. Washington, DC. 1998.

SUZUKI, L. E. A. S.; CASALINHO, H. D.; MILANI, I. C. B. Strategies and Public Policies for Soil and Water Conservation and Food Production in Brazil. **Soil Systems**, v. 8, n. 2, 1 jun. 2024.

TAMADA, I. S. *et al.* Toxicological evaluation of vegetable oils and biodiesel in soil during the biodegradation process. **Brazilian Journal of Microbiology**, p. 1576–1581, 2012.

TARLA, D. N. *et al.* Phytoremediation and bioremediation of pesticide-contaminated soil. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 4, 1 fev. 2020.

TAROLLI, P. *et al.* Soil salinization in agriculture: Mitigation and adaptation strategies combining nature-based solutions and bioengineering. **iScience**, v. 27, n. 2, 16 fev. 2024.

TEACĂ, C. A.; BODÎRLĂU, R. Toxicity assay assessment. **BioResources**, v. 3, n. 4, 2008.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (orgs.). *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

TERWAYET BAYOULI, I. *et al.* Ecological indicators and bioindicator plant species for biomonitoring industrial pollution: Eco-based environmental assessment. **Ecological Indicators**, v. 125, 1 jun. 2021.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. Guidance for assessment contaminant data for use in fish advisories. Washington DC, 2000, v.2.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwater and marine organisms. 5 ed. EPA: Washington, 2002.

USLU, Ö. S. *et al.* Effects of Different Irrigation Water Sources Contaminated with Heavy Metals on Seed Germination and Seedling Growth of Different Field Crops. **Water (Switzerland)**, v. 17, n. 6, 1 mar. 2025.

VAN STRAALLEN, N.M., VAN GESTEL, C.A.M. A stress ecology framework for comprehensive risk assessment of diffuse pollution. *Sci Total Environ.* 406: 479-483. 2008.

VITAL, T.; SAMPAIO, Y. Agricultura familiar e fruticultura irrigada-estudos de caso no nordeste tales vital yony sampaio agricultura familiar e fruticultura irrigada-estudos de caso no nordeste. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, v. 4, p. 275–290, 2004.

WANG, G. *et al.* Statistical Analysis and Modeling of the Geometry and Topology of Plant Roots. 15 out. 2019.

WANG, Y. *et al.* Soil moisture and salinity dynamics of drip irrigation in saline-alkali soil of Yellow River basin. **Frontiers in Environmental Science**, v. 11, 2023.

WHARFE, J. *et al.* In situ methods of measurement—An important line of evidence in the environmental risk framework. **Integrated Environ. Assess. Manag.** 3, 268–274, 2007.

WYSZKOWSKA, J. *et al.* The Impact of Soil Contamination with Lead on the Biomass of Maize Intended for Energy Purposes, and the Biochemical and Physicochemical Properties of the Soil. **Energies**, v. 17, art. 1156, 2024.

YADAV, A.; YADAV, K. Portable solutions for plant pathogen diagnostics: development, usage, and future potential. **Frontiers in Microbiology**, v. 16, 2025.

ZAGATTO, P. A.; BERTOLETTI, E. *Ecotoxicologia Aquática – Princípios e Aplicações*. Editora Rima: São Carlos, 2006.

APÊNDICE A – APLICAÇÃO DO PROTOCOLO OECD 208/2006 NA PESQUISA

Neste trabalho, o protocolo OECD 208/2006 foi aplicado com adaptações para avaliar a germinação e o crescimento inicial de plântulas em solos provenientes do Perímetro de Irrigação São João, em Porto Nacional – TO. O ensaio foi conduzido em condições controladas de laboratório, seguindo as recomendações gerais da norma, mas utilizando espécies de relevância agrícola regional: o milho (*Zea mays*) e o tomate (*Solanum lycopersicum*).

Foram coletadas amostras de solo em áreas agrícolas e de vegetação nativa, utilizadas como referência. As sementes foram expostas diretamente aos diferentes tipos de solo, previamente preparados e acondicionados em recipientes adequados. Durante o período de exposição, monitoraram-se parâmetros como:

- Taxa de germinação das sementes;
- Sobrevivência das plântulas;
- Massa fresca e massa seca.

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente para estimar os efeitos de cada tipo de solo, incluindo a determinação de parâmetros como NOEC (Concentração sem efeito observado), LOEC (Concentração com menor efeito observado) e ECx (concentração efetiva em x% dos organismos expostos). Essas análises permitiram identificar a presença de possíveis efeitos ecotoxicológicos em solos agrícolas comparados aos solos de referência.

A aplicação prática do protocolo OECD 208/2006 neste estudo demonstrou sua utilidade como ferramenta para avaliação integrada da qualidade do solo, contribuindo para o diagnóstico precoce de impactos ambientais e para o manejo sustentável da fruticultura irrigada no Tocantins.