



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS PRINCESA ISABEL
CURSO SUPERIOR DE LICENCIATURA EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

EMELLY KERONN FERREIRA SOARES DA SILVA

AVALIAÇÃO DO ESTRESSE OXIDATIVO E RESPOSTA ANTIOXIDANTE EM
DECORRÊNCIA DO TRATAMENTO COM CHUMBO (PB) NO CRESCIMENTO E
DESENVOLVIMENTO DO MILHO (*Zea mays L.*)

PRINCESA ISABEL

2025

EMELLY KERONN FERREIRA SOARES DA SILVA

AVALIAÇÃO DO ESTRESSE OXIDATIVO E RESPOSTA ANTIOXIDANTE EM
DECORRÊNCIA DO TRATAMENTO COM CHUMBO (PB) NO CRESCIMENTO E
DESENVOLVIMENTO DO MILHO (*Zea mays L.*)

Trabalho de Conclusão do Curso, modelo Monografia, apresentado ao Curso Superior de Licenciatura em Ciências Biológicas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, *Campus* Princesa Isabel, como requisito necessário para obtenção do título de Licenciado em Ciências Biológicas.

Orientador(a): Dr. Wydemberg José de Araújo

PRINCESA ISABEL

2025

S586a Silva, Emelly Keronn Ferreira Soares da.
Avaliação do estresse oxidativo e resposta antioxidante em decorrência do tratamento com chumbo (pb) no crescimento e desenvolvimento do milho (zea mays l.) / Emelly Keronn Ferreira Soares da Silva. – 2025.
53 f : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Superior de Licenciatura em Ciências Biológicas) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Princesa Isabel, 2025.

Orientador(a): Prof. Dr. Wydemberg José de Araújo.

1. Ciências biológicas. 2. Chumbo - Espécies Reativas - Oxigênio. 3. Lixão. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II. Título.

IFPB/PI

CDU 574

TERMO DE APROVAÇÃO

EMELLY KERONN FERREIRA SOARES DA SILVA

AVALIAÇÃO DO ESTRESSE OXIDATIVO E RESPOSTA ANTIOXIDANTE EM
DECORRÊNCIA DO TRATAMENTO COM CHUMBO (PB) NO CRESCIMENTO E
DESENVOLVIMENTO DO MILHO (*Zea mays L.*)

Trabalho de Conclusão do Curso, modelo Monografia, apresentado ao Curso Superior de Licenciatura em Ciências Biológicas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, campus Princesa Isabel, como requisito necessário para obtenção do título de Licenciado em Ciências Biológicas e aprovado pela banca examinadora.

Aprovado em: 08/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wydemberg José de Araújo(Orientador)
Instituto Federal da Paraíba - IFPB

Profa. Me. Maria Aparecida M. Araujo
Instituto Federal da Paraíba - IFPB

Prof. Dr. Jandiê Araujo da Silva
Instituto Federal da Paraíba - IFPB

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte inesgotável de sabedoria e força, agradeço por me conceder perseverança e serenidade ao longo desta jornada acadêmica. Sua presença foi essencial nos momentos de incerteza e dificuldade.

À minha família, minha base e principal suporte, expressei minha mais profunda gratidão. Em especial aos meus avós: Maria de Fátima e Sebastião Pereira, à minha mãe Emanuelle Soares, e ao meu irmão Ermersonn Keveynn, pelo apoio incondicional, pelas palavras de encorajamento e pelo incentivo constante a não desistir dos meus sonhos.

Ao meu noivo, Gabriel André, agradeço pelo carinho, compreensão e incentivo durante todos os desafios enfrentados neste percurso. Sua presença e apoio foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador, Dr. Wydemberg José de Araújo, agradeço imensamente pela orientação atenta, pela paciência, amizade e pelos valiosos ensinamentos transmitidos ao longo da realização deste trabalho. À Professora Dra. Kátia Daniella da Cruz Saraiva, registro minha gratidão pela disponibilidade, pela generosidade no compartilhamento de materiais e conhecimentos, e pela cordialidade e entusiasmo demonstrados em todas as etapas deste processo.

Agradeço também aos Professores Profa. Me. Maria Aparecida M. Araujo e Prof. Dr. Jandiê pelas importantes contribuições oferecidas na avaliação deste trabalho, bem como pela atenção e disponibilidade demonstradas durante a banca.

Estendo meus agradecimentos a toda equipe do Instituto Federal da Paraíba, Campus Princesa Isabel, pelo apoio recebido ao longo da minha formação acadêmica e profissional. De forma especial, agradeço ao técnico de laboratório Leandro, à técnica Cristiane e ao segurança Adeison, pela paciência, pela troca de informações, e pela colaboração fundamental na realização dos experimentos laboratoriais.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

“Não é o mais forte que sobrevive,
nem o mais inteligente, mas o que
melhor se adapta às mudanças”.

Charles Darwin, A Origem das Espécies

AVALIAÇÃO DO ESTRESSE OXIDATIVO E RESPOSTA ANTIOXIDANTE EM DECORRÊNCIA DO TRATAMENTO COM CHUMBO (PB) NO CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DO MILHO (*Zea mays L.*)

RESUMO

A poluição ambiental por metais pesados representa um dos maiores desafios ecológicos da atualidade, devido à sua alta persistência e capacidade de bioacumulação em diferentes compartimentos ambientais, como lagos, rios, lençóis freáticos e solos. O chumbo (Pb) destaca-se por sua elevada toxicidade e abundância, afetando de forma significativa tanto a saúde humana quanto o desenvolvimento de espécies vegetais. No entanto, os mecanismos de toxicidade e os danos fisiológicos e bioquímicos causados pela exposição ambiental ao chumbo em plantas ainda não são completamente compreendidos. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos do nitrato de chumbo [Pb(NO₃)₂] em plantas de milho cultivadas em solo de agrícola localizados no município de Princesa Isabel-PB. Foram analisados parâmetros de crescimento, incluindo massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR) e massa seca total (MST), além de indicadores bioquímicos de estresse oxidativo, como o vazamento de eletrólitos (VE), nível de peroxidação lipídica e atividade da enzima ascorbato peroxidase (APX). Os resultados revelaram que as plantas expostas à solução de 0,5 mM de nitrato de chumbo apresentaram reduções significativas no crescimento, com menor produção de biomassa e evidências de estresse oxidativo. Houve aumento no vazamento de eletrólitos e na atividade da enzima APX, indicando resposta antioxidante ao estresse, embora a peroxidação lipídica não tenha aumentado proporcionalmente, possivelmente em razão da redução da biomassa vegetal. Além disso, observou-se que a qualidade do solo exerce influência direta sobre as respostas fisiológicas das plantas, e que o milho apresenta potencial relevante para uso em estratégias de fitorremediação de áreas contaminadas.

Palavras-chave: Chumbo; Espécies reativas de oxigênio; Lixão; *Vigna unguiculata*; *Zea Mays*

ABSTRACT

Environmental pollution by heavy metals represents one of the major ecological challenges of our time due to their high persistence and bioaccumulation capacity in various environmental compartments such as lakes, rivers, groundwater, and soils. Lead (Pb) stands out for its high toxicity and widespread occurrence, significantly affecting both human health and the development of plant species. However, the mechanisms of toxicity and the physiological and biochemical damage caused by environmental lead exposure in plants are not yet fully understood. In this context, the present study aimed to evaluate the effects of lead nitrate [Pb(NO₃)₂] on maize (*Zea mays* L.) plants grown in agricultural soil located in the municipality of Princesa Isabel, Paraíba, Brazil. Growth parameters were analyzed, including shoot dry mass (SDM), root dry mass (RDM), and total dry mass (TDM), as well as biochemical indicators of oxidative stress, such as electrolyte leakage (EL), lipid peroxidation levels, and the activity of the enzyme ascorbate peroxidase (APX). The results showed that plants exposed to a 0.5 mM solution of lead nitrate exhibited significant reductions in growth, lower biomass production, and evidence of oxidative stress. There was an increase in electrolyte leakage and APX activity, indicating an antioxidant response to stress, although lipid peroxidation did not increase proportionally, possibly due to the reduction in plant biomass. Furthermore, soil quality was found to directly influence the physiological responses of plants, and maize demonstrated notable potential for application in phytoremediation strategies in contaminated areas.

Keywords: Lead; Reactive oxygen species; Landfill; *Vigna unguiculata*; *Zea mays*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa geográfico mostrando a localização do sítio Chico Evaristo, localizado em Princesa Isabel – PB. Mapa produzido no sistema de coordenadas QGIS CLOUD.

Figura 2 - Processo metodológico para análise granulométrica por peneiramento solo 1.

Figura 3- Processos metodológicos da semeadura das sementes para obtenção do material vegetal.

Figura 4- Plantas de milho sendo submetidas ao estresse com nitrato de chumbo a 0,5 mM, lado esquerdo controle e direito estresse.

Figura 5- Processos metodológicos para obtenção dos extratos enzimáticos

Figura 6- Processos metodológicos para a etapa de peroxidação lipídica

Figura 7- Plantas de milho cultivadas no solo coletado na propriedade de Chico Evaristo (Solo 1). Durante a fase de submissão do estresse, plantas foram regadas com solução nutritiva contendo $[Pb(NO_3)_2]$ 5 mM (Grupo tratado) e outro grupo de plantas recebeu apenas solução nutritiva (Grupo controle).

Figura 8. Massa seca da parte aérea (MSPA) de plantas de milho cultivadas no solo 1 regadas com solução nutritiva na ausência (controle) e presença de $[Pb(NO_3)_2]$ a 5 mM (estresse). As diferenças significativas entre os tratamentos estão indicadas no gráfico, conforme determinado pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os dados representam a média de três repetições \pm erro padrão.

Figura 9- Massa seca da raiz (MSR) de plantas de milho cultivadas no solo 1 e regadas com solução nutritiva na ausência (controle) e presença de $[Pb(NO_3)_2]$ a 5 mM (estresse). As diferenças significativas entre os tratamentos estão indicadas no gráfico, conforme determinado pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os dados representam a média de três repetições \pm erro padrão.

Figura 10- . Massa seca total (MST) de plantas de milho cultivadas no solo 1 e regadas com solução nutritiva na ausência (controle) e presença de $[Pb(NO_3)_2]$ a 5mM (estresse).As diferenças significativas entre os tratamentos estão indicadas no gráfico, conforme determinado pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os dados representam a média de três repetições \pm erro padrão.

Figura 11-. Vazamento de eletrólitos (VE) de plantas de milho cultivadas no solo 1 regadas com solução nutritiva na ausência (controle) e presença de $[Pb(NO_3)_2]$ a 5 mM (estresse). SPC – Solo de propriedade não contaminada (controle); . As diferenças significativas entre os tratamentos estão indicadas no gráfico, conforme determinado pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os dados representam a média de três repetições \pm erro padrão.

Figura 12- Peroxidação Lipídica retratando os danos oxidativos comparando entre o solo 1 tratamentos grupo controle e estresse. As diferenças significativas entre os tratamentos estão indicadas no gráfico, conforme determinado pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os dados representam a média de três repetições \pm erro padrão.

Figura 13- Atividade da enzima ascorbato peroxidase- APX retratando as curvas dos danos comparados entre o solo 1 controle e estresse. As diferenças significativas entre os tratamentos estão indicadas no gráfico, conforme determinado pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os dados representam a média de três repetições \pm erro padrão.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Pb- Chumbo

APX – Ascorbato peroxidase

CO₂ – Dióxido de carbono

EROs – Espécies reativas de oxigênio

H⁺ - Íon hidrogênio

pH- Potencial hidrogênio (H⁺)

DAS- Dias após semeadura

PVC-Policloreto de vinila

CTC- capacidade de troca de cátions

CE- Condutividade elétrica

VE- Vazamento de eletrólitos

H₂O₂ – Peróxido de hidrogênio

MPA-Massa seca da parte aérea

MSR- Massa seca da Raiz

MST- Massa seca total

EMATER- Instituto de de asistencia tecnica e extensao rural

EMBRAPA-Empresa Brasileira de pesquisa agropecuária

SUMÁRIO

1. Introdução	13
2. Objetivos	16
2.1 Objetivo específicos	16
3. Referencial Teórico	17
3.1 Milho(<i>Zean May L.</i>)	17
3.2 Impactos da contaminação ambiental por chumbo (Pb) e seus efeitos no estresse oxidativo em plantas	17
3.3 Especies Reativas de oxígeno (EROs)	19
3.4 Peroxidação lipídica seus efeitos induzidos pela exposição ao chumbo	20
3.5 Enzima APX e seus efeitos provocados pela exposição do chumbo	20
4. Materiais e métodos	22
4.1 Coleta dos solos	22
4.2 Análises físicos- químicas da qualidade do solos	23
4.1.2 Análise granulométrica por peneiramento	23
4.2.2 Análises Ph dos solos	24
4.3 Semeadura das sementes para obtenção do material vegetal	24
4.4 Aplicação do estresse com nitrato de chumbo	26
4.5 Análises dos parâmetros de crescimento e bioquímicos	27
4.5.1 Coleta do material vegetal e análises de crescimento	27
4.5.2 Vazamento de eletrólitos (VE)	27
4.6 Efeitos antioxidantes nas plantas	27
4.6.1 Extratos enzimáticos	27
4.6.2 Peroxidação lipídica	28
4.6.3 Peroxidação ascorbato	29
5. Resultados e Discussão	30
5.1 Características físicas- químicas dos solos analisados	30
5.2 Aspectos visuais das plantas de milho submetidas ao estresse com nitrato de chumbo	31
5.3 Parâmetros de crescimento: produção de biomassa (MSPA, MSR, MST)	32
5.3.1 Massa seca da parte aérea (MPA)	32
5.3.2 Massa seca da Raiz (MSR)	34
5.3.3 Massa seca total (MST)	36
5.4 Parâmetros bioquímicos: danos oxidativos	37

5.5 Efeitos antioxidantes das plantas	39
5.5.1 Peroxidação lipídica	39
5.5.2 Atividade APX	40
6.Considerações Finais	43
Referências	44

INTRODUÇÃO

A contaminação por metais pesados é uma das principais preocupações ambientais da atualidade, devido à sua elevada persistência no meio ambiente e aos impactos negativos que causa na saúde humana e animal por meio da cadeia alimentar. Entre os metais pesados o chumbo (Pb) destaca-se como um dos poluentes mais significativos do meio ambiente, devido, principalmente, ao seu amplo uso na indústria, sendo empregado na fabricação de ligas (como bronze e latão), PVC, borrachas, vidros, cabos elétricos, soldas, chapas elétricas, além da produção e recuperação de baterias (Grigoletto, 2011).

A exposição ao chumbo no ambiente gera efeitos prejudiciais em diversos sistemas do corpo humano, como os sistemas neurológico, hematológico, metabólico e cardiovascular (Fortes, 2003; Memon; Schröder, 2009). Já os impactos sobre os sistemas vegetais ainda não são totalmente compreendidos. No entanto, muitos estudos apontam que o estresse causado por esse metal está associado ao acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), o que desencadeia estresse oxidativo (Gupta et al., 2009; Mittler et al., 2004; Rodrigues et al., 2016).

A produção excessiva de EROs provoca danos a biomoléculas cruciais ao funcionamento celular, tais como lipídeos de membrana, proteínas e ácidos nucleicos. O que leva a uma menor produtividade das espécies de importância agrícola (Srinivasan *et al.*, 2014). Embora o chumbo não seja essencial às plantas, uma vez que não participa de processos metabólicos vitais das mesmas, ele é facilmente absorvido no sistema radicular na forma bivalente (Pb⁺²), essa absorção ocorre de acordo com cada espécie e é influenciada pelo pH e capacidade de troca de cátions do solo (Dos Reis, 2016).

Quando absorvido, o chumbo exerce uma forte influência negativa no processo de crescimento da planta, uma vez que nem todas possuem mecanismos de tolerância à absorção dele. Para algumas plantas a presença do Pb no solo, mesmo sendo em baixas concentrações, pode acarretar mudanças em sua morfologia, estrutura e fisiologia, influenciando desta forma, no crescimento do sistema radicular, na produção de clorofila e inibição da divisão celular, dentre outros parâmetros que podem ser considerados indicadores de fitotoxicidade da planta (Bighi, 2016).

Em virtude desses efeitos deletérios dos metais pesados para as espécies vegetais, muitos pesquisadores têm centrado as suas pesquisas na tentativa de compreender as respostas de diferentes plantas a essa condição ambiental adversa (Medina, 2015; Pereira, 2013). Nesse

sentido, torna-se interessante conhecer essas respostas em diferentes culturas vegetais, a exemplo de monocotiledôneas, tal como o milho (*Zea mays L.*).

O milho (*Zea mays L.*) é uma planta da família Poaceae e da espécie *Zea mays*. É um cereal de alta qualidade nutritiva, pois contém, predominantemente, carboidratos (amido) e lipídeos (óleo) (Pereira, 2019). O grão de milho é um fruto, denominado cariopse, em que o pericarpo está fundido com o tegumento da semente (Filgueiras, 1986). Sua cultura encontra-se amplamente disseminada no Brasil, o que se deve tanto à sua multiplicidade de usos na propriedade rural, quanto à tradição de cultivo pelos agricultores brasileiros, tendo em vista que consegue se adaptar a diferentes condições ambientais e pode ser cultivado em várias regiões do país, principalmente no Nordeste brasileiro (Pandolfo, 2017).

Pesquisas com milho e nitrato de chumbo são limitadas. Alguns estudos abordaram os efeitos na germinação (Ueno, 2016), morfoanatomia foliar (Medeiros, 2015), e fotossíntese (Gomes, 2012), contudo, até o momento, não há investigações que evidenciem as respostas aos efeitos fisiológicos, bioquímicos e danos oxidativos do milho ao estresse com nitrato de chumbo em diferentes tipos de solos.

O milho, além de ser uma das culturas agrícolas mais importantes globalmente, também é essencial para a economia e segurança alimentar brasileira. De acordo com dados da Companhia nacional de abastecimento- Conab (2025), a produção brasileira de milho foi estimada em 126,9 milhões de toneladas em 2024/25, em uma área de 22,5 milhões de hectares. Essa cultura, amplamente utilizada para alimentação humana e ração animal, destaca-se por seu alto potencial produtivo, podendo alcançar produtividades superiores a 16 toneladas por hectare. No entanto, a presença de contaminantes como o chumbo no solo pode comprometer não apenas o rendimento da produção, mas também a qualidade nutricional dos grãos, impactando diretamente a segurança alimentar.

Neste contexto, a presente pesquisa busca investigar os efeitos do nitrato de chumbo em culturas de milho cultivadas em solo de agricultura orgânica, explorando e analisando seus impactos sob parâmetros de crescimento, indicadores bioquímicos e na atividade de enzimas antioxidantes, essenciais na defesa contra o estresse oxidativo causado por metais pesados. A compreensão dos mecanismos fisiológicos e bioquímicos envolvidos na resposta das plantas à presença de contaminantes no solo permite identificar estratégias de mitigação ambiental baseadas na própria capacidade adaptativa vegetal. Tais estratégias incluem, por exemplo, a indução de respostas antioxidantes, a complexação de metais pesados por compostos celulares, o sequestro de íons tóxicos em vacúolos e a ativação de

vias metabólicas específicas que reduzem os danos oxidativos causados pelos poluentes. Essas respostas não apenas protegem o metabolismo da planta, como também oferecem subsídios valiosos para a ecotoxicologia vegetal e para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis, voltadas à recuperação de áreas contaminadas e à segurança na produção de alimentos. Nesse contexto, o milho (*Zea mays* L.) tem sido amplamente estudado como uma espécie com potencial fitorremediador, devido à sua capacidade de tolerar, absorver e acumular metais pesados como o chumbo (Pb). Estudos como o de Mojiri (2011) demonstram que *Z. mays* atua como um eficiente bioacumulador de Pb em solos contaminados, evidenciando sua aplicabilidade como ferramenta de fitorremediação em ambientes degradados, contribuindo diretamente para a redução dos impactos ambientais e para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o estresse oxidativo causado pelo nitrato de chumbo em plantas de milho (*Zea mays L.*), através da avaliação de parâmetros de crescimento, indicadores bioquímicos e atividades enzimáticas antioxidantes, em solo de agricultura orgânica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar os parâmetros físico-químicos do solo oriundos da agricultura orgânica, avaliando o crescimento de plantas de milho sob estresse induzido pelo nitrato de chumbo;
- Analisar os parâmetros de crescimento (produção de biomassa MSPA, MSR e MST) e os parâmetros bioquímicos (danos oxidativos) das plantas expostas ao nitrato de chumbo;
- Investigar os danos celulares por meio da peroxidação lipídica, avaliada através da concentração de substâncias reativas ao ácido 2-tiobarbitúrico (TBA), sob a ação do estresse do nitrato de chumbo;
- Realizar a extração e quantificação da atividade da enzima antioxidante ascorbato peroxidase (APX) frente ao estresse provocado pelo nitrato de chumbo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Milho (*Zean May L.*)

A produção de milho (*Zea mays L.*) é uma das atividades agrícolas mais relevantes e difundidas em âmbito global, sendo amplamente reconhecida como um pilar essencial da cultura e economia brasileira (Embrapa, 2023). Esse cereal, classificado como uma cariopse e pertencente à família Poaceae, teve sua origem possivelmente no México, de onde se espalhou para regiões como os Estados Unidos e as Antilhas (Conab, 2010). No Brasil, seu cultivo antecede a chegada dos colonizadores portugueses, sendo inicialmente realizado pelas populações indígenas. Contudo, foi durante o período colonial que a produção de milho ganhou maior destaque, consolidando-se como uma das principais culturas agrícolas do país (Medina, 2020).

Atualmente, o milho detém significativa importância econômica no Brasil, sendo cultivado em larga escala, com a maior parte de sua produção destinada à alimentação animal, seja na formulação de rações ou como grão in natura. Além disso, o milho desempenha um papel crucial na indústria de alimentos, servindo como matéria-prima para diversos produtos e pratos típicos da culinária brasileira, como pamonhas, cremes, angus, mingaus, cuscuz, polenta e bolos, entre outros (Pereira, 2017).

O expressivo cultivo do milho no Brasil é favorecido tanto pelas características naturais do território quanto pela notável capacidade de adaptação da espécie. O milho é altamente versátil, sendo capaz de se desenvolver em diferentes condições climáticas e em praticamente todas as regiões do país (Pandolfo, 2017). Essa adaptabilidade permite que a cultura prospere em variados contextos agrícolas, corroborando como uma das mais importantes no cenário nacional.

Entretanto, mesmo com sua adaptabilidade, o milho enfrenta diversos fatores adversos que podem comprometer seu desenvolvimento e produtividade, entre esses desafios estão altas temperaturas (Sbrussi, 2014), déficit hídrico (Brito, 2013), salinidade dos solos (Gomes, 2011) e outros estresses ambientais (Embrapa, 2015). Além disso, as atividades humanas têm agravado essas dificuldades, principalmente pela contaminação do solo com metais pesados, a exemplo o chumbo (Cruz, 2012).

3.2 Impactos da contaminação ambiental por chumbo (Pb) e seus efeitos no estresse oxidativo em plantas

O chumbo (Pb) é um elemento químico de número atômico 82 (82 prótons e elétrons), e massa atômica de 207,2 u. Pertencente ao grupo 12 (ou IVA) da tabela periódica, é um metal

pesado de coloração cinza-azulada (Zanchetta, 2007). Naturalmente, é encontrado na superfície do solo, geralmente associado a minérios, especialmente aqueles ricos em zinco (Ribeiro, 2013). Devido ao seu alto valor econômico, é uma das principais fontes de extração mineral (Souza et al., 2011).

O chumbo pode ser utilizado na forma metálica pura, ligado com outros elementos ou como composto químico (Dessuy, 2011). Seu uso se estende por diversos setores, incluindo a indústria química e a construção civil (Azevedo, 2003), sendo aplicado em produção de ligas (bronze, latão), fabricação e recuperação de baterias, esmaltação de cerâmicas, fabricação de pigmentos, PVC e outros plásticos, borrachas, vidros, cabos elétricos, soldas de peças, chapas elétrica, revestimentos de cabos, lâminas de proteção contra radiação, baterias e outros segmentos industriais (Silva, 2015).

Embora o Pb seja essencial e amplamente utilizado na indústria, ele é frequentemente descartado no meio ambiente por atividades humanas, espalhando-se pelo solo, água e ar, principalmente devido ao descarte inadequado de resíduos industriais (Morais, 2011). A exposição direta é perigosa, já que o Pb não é metabolizado pelo corpo humano, acumulando-se com o tempo e aumentando os riscos à saúde (Brasil, 2023).

Assim como os humanos e outros seres vivos, as plantas também são afetadas por condições de estresse ocasionados pelo chumbo, o qual compromete seu crescimento e desenvolvimento saudável (Jones et al., 2006). No solo, o metal pesado causa sérios danos ao crescimento das plantas. O contato direto prejudica o desenvolvimento, pois muitas espécies não possuem mecanismos de tolerância à sua absorção (Pereira et al., 2013).

Mesmo em baixas concentrações, o Pb altera a morfologia, estrutura e fisiologia vegetal, afetando o sistema radicular, a produção de clorofila e a divisão celular (Bighi, 2016). Sua toxicidade provoca clorose foliar, inibição da germinação de sementes e alterações enzimáticas e na permeabilidade das membranas celulares (Santos, 2015).

O estresse oxidativo em plantas ocorre quando há um desequilíbrio entre a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) e a capacidade dos sistemas antioxidantes de neutralizá-las, resultando em danos celulares (Silva, 2024). Esse processo compromete diversas funções metabólicas das plantas, incluindo a fotossíntese, que é especialmente sensível à toxicidade do Pb (Boscolo et al., 2003).

Durante a fotossíntese, o chumbo afeta tanto as reações fotoquímicas quanto as de carboxilação, reduzindo significativamente a eficiência do processo (Oliveira, 2012). Plantas expostas a essa substância apresentam diminuição na taxa fotossintética devido à degradação

da estrutura do cloroplasto, inibição da síntese de clorofila, plastoquinona e carotenóides, bloqueio no transporte de elétrons e redução da atividade enzimática (Sharma, 2005).

A exposição das plantas a esse metal pesado, também provoca a peroxidação de lipídios, alterações na atividade das enzimas antioxidantes e aumento na produção de tióis, comprometendo a integridade celular e o metabolismo vegetal (Jones et al., 2006). Estudos recentes apontam que o chumbo pode estimular a expressão de genes relacionados à defesa antioxidante, como os que codificam as enzimas glutatona redutase, glutatona S-transferase, ascorbato peroxidase e superóxido dismutase (Dubey, 2003).

3.3 Espécie Reativas de oxígeno (EROs)

O oxigênio desempenha um papel fundamental no crescimento e desenvolvimento do organismo humano. No entanto, a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) pode comprometer os processos celulares normais, levando à disfunção e até à morte celular (Silva, 2021). Esse fenômeno ocorre não apenas no metabolismo de animais e humanos, mas também no das plantas, no caso das plantas, a produção de EROs é um evento comum no metabolismo de células aeróbicas (Sousa et al., 2019). Sua geração pode estar associada a diversos fatores, incluindo a respiração mitocondrial e as vias metabólicas ligadas à fotossíntese nos cloroplastos (Barbosa, 2014). Embora a produção basal de EROs seja relativamente baixa, determinados estímulos ambientais e fisiológicos podem desregular a homeostase celular, intensificando sua geração e resultando em estresse oxidativo (Carvalho, 2013). Nesse contexto, as EROs são frequentemente consideradas biomarcadores de resposta a agentes estressores, desempenhando um papel central na sinalização celular e na adaptação das plantas a condições adversas (Mittler, 2008).

As Espécies Reativas de Oxigênio (EROs) são derivados instáveis do oxigênio molecular (O_2), formados por excitação para oxigênio singleto (O_2^1) ou pela adição de um, dois ou três elétrons, originando respectivamente o radical superóxido (O_2^-), o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o radical hidroxila ($OH\bullet$) (Veronica, p.24, 2010). Devido à presença de elétrons desemparelhados, essas moléculas são altamente reativas e inespecíficas, promovendo reações peroxidativas que podem comprometer a integridade das membranas celulares e de macromoléculas essenciais, como pigmentos, proteínas, ácidos nucleicos e lipídios, resultando em danos celulares significativos (Nike, 2009). Compostos altamente reativos como o OH , tendem a exercer efeitos negativos sobre as moléculas vivas, absorvendo o hidrogênio (H), causando o que se denomina peroxidação dos lipídios. (Dubey, 2003) .

3.4 Peroxidação lipídica e seus efeitos induzidos pela exposição ao chumbo

A peroxidação lipídica é um processo em que os lipídios das membranas celulares sofrem oxidação devido ao estresse oxidativo, é um dos efeitos mais devastadores causados pela exposição ao chumbo em plantas (Pereira,2003). A degradação oxidativa dos lipídios é frequentemente iniciada pela formação de espécies reativas de oxigênio, que interagem com os lipídios das membranas, gerando hidroperóxidos e outros compostos altamente reativos (Peixoto et al., 2001).

De acordo com Morais (2011), o acúmulo excessivo de EROs, aliado à ineficiência do sistema antioxidante, leva a danos oxidativos que podem prejudicar seriamente as células vegetais. A peroxidação lipídica, como consequência desse acúmulo de radicais livres, danifica as membranas celulares e altera sua fluidez e permeabilidade, processos essenciais para a integridade da célula (Lopes, 2005). O chumbo, nesse contexto, é responsável por causar lesões nas membranas celulares de diversas plantas, incluindo feijão-de-corda, arroz e milho, levando a uma série de disfunções fisiológicas (Morais, 2011).

Em cultivares a peroxidação lipídica afeta funções vitais como o transporte de nutrientes e a comunicação intercelular (Souza, 2016). Além disso, o Pb pode inibir a atividade da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco), enzima chave na fotossíntese, reduzindo a eficiência desse processo. Essa inibição, combinada com a peroxidação lipídica, resulta em danos significativos às células vegetais (Barbosa,2010).

3.5 Enzima APX e seus efeitos provocados pela exposição do chumbo

A enzima Ascorbato Peroxidase (APX) desempenha um papel crucial na proteção das células vegetais contra o estresse oxidativo causado por radicais livres, especialmente durante condições ambientais adversas. A APX atua na degradação do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) usando o ascorbato como doador de elétrons, convertendo-o em água e contribuindo para a manutenção do equilíbrio redox celular (Noctor et al., 2018). Esse mecanismo é fundamental para a proteção das células vegetais contra danos oxidativos, que podem ser exacerbados por poluentes ambientais, como o chumbo (Pb), que é um metal pesado tóxico amplamente distribuído no ambiente devido à atividade industrial (Verma & Dubey, 2003).

A exposição ao chumbo tem sido associada a distúrbios na função celular das plantas, incluindo a indução de estresse oxidativo e a alteração no funcionamento de várias enzimas antioxidantes, incluindo a APX. Segundo estudos de Kumar et al. (2016), o Pb pode causar um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), como o H_2O_2 , que, em

altas concentrações, levam a danos celulares e à redução da eficiência fotossintética. A ativação da APX tem sido observada como uma resposta adaptativa, uma tentativa das plantas de mitigar os efeitos tóxicos do Pb ao reduzir a concentração de peróxido de hidrogênio. No entanto, essa resposta pode ser insuficiente em casos de exposição prolongada ou em concentrações elevadas de Pb.

No entanto, a capacidade da APX de reduzir o estresse oxidativo induzido pelo Pb varia entre espécies vegetais. Pesquisas de Sharma e Dubey (2005) indicam que a atividade da APX pode ser inibida em plantas expostas a altas concentrações de Pb, o que resulta em uma diminuição na capacidade antioxidante geral e um aumento nos danos celulares, afetando processos metabólicos essenciais. Além disso, a exposição ao Pb pode alterar a expressão gênica relacionada à APX, comprometendo a resposta antioxidante de plantas em ambientes contaminados. Assim, a eficiência da APX na neutralização do estresse provocado pelo Pb depende tanto da espécie vegetal quanto da intensidade e duração da exposição ao metal pesado, evidenciando a complexidade dessa interação

4 MATERIAIS E MÉTODOS

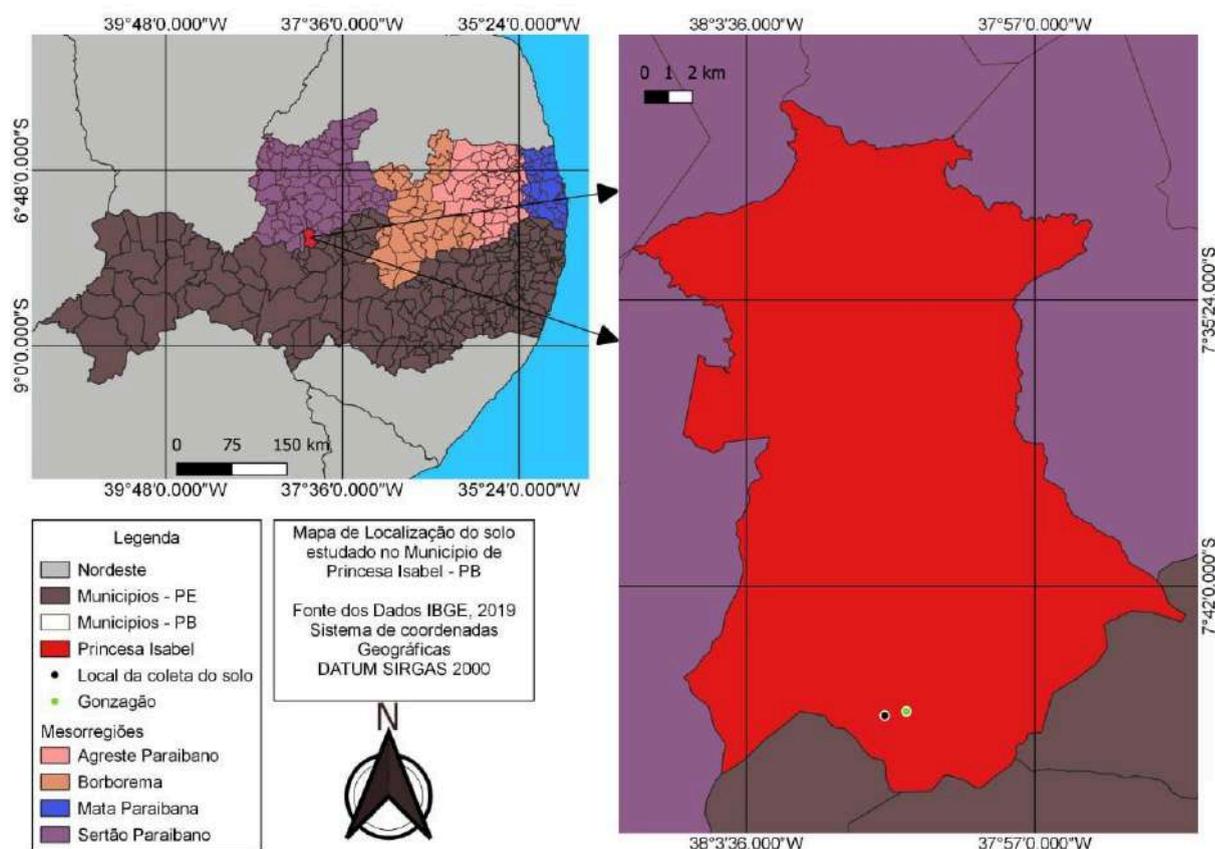
4.1. Coleta dos Solos

O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado em 19 de novembro de 2024, no Sítio

Chico Evaristo, localizado no município de Princesa Isabel, Paraíba, nas proximidades do Estádio de Futebol Gonzagão (Figura 1). A escolha desse local baseou-se na realização de práticas agroecológicas na área, destacando-se pela ausência do uso de agrotóxicos, uma vez que a terra pertence aos descendentes que mantêm, até o presente momento, a tradição de cultivo sem a utilização desses produtos. Essa característica assegura a preservação das propriedades naturais do solo, permitindo uma análise mais fiel de sua qualidade e fertilidade dentro de um sistema produtivo sustentável. Ao longo desta pesquisa, este solo receberá a nomenclatura de solo 1;

As áreas desta propriedade são submetidas a diferentes sistemas de manejo. No entanto, as amostras coletadas em cada local foram agrupadas para formar um único tipo distinto de solo, denominados como solo 1. Em cada área, foram coletadas 5 amostras na profundidade de 0 a 10 cm, seguindo as diretrizes metodológicas da Embrapa (EMBRAPA Rondônia, 2020). Após a coleta, as amostras foram homogeneizadas e acondicionadas em sacos plásticos devidamente lacrados.

Figura 1 - Mapa geográfico mostrando a localização do sítio Chico Evaristo, localizado em Princesa Isabel – PB. Mapa produzido no sistema de coordenadas QGIS CLOUD.



fonte: arquivo pessoal da autora, 2025

4.2 Análises físico-químicas da qualidade do Solos

4.2.1 Análise granulométrica por peneiramento

As amostras dos solos foram secas ao ar livre por 24h e destorradas com almofariz de mão com grau revestido de borracha, garantindo a desagregação dos torrões sem alterar o tamanho das partículas. Posteriormente, foram reduzidas por quarteamento até atingirem aproximadamente 2000 g. O material foi então peneirado conforme a norma DRER- ME 080/94, utilizando peneiras na ordem adequada (Figura 2). Registrou-se a massa retida em cada peneira para a construção da curva granulométrica, e as frações retangulares para construção da tabela granulométrica.

Figura 2- Processos metodológicos para análise granulométrica por peneiramento do solo 1



Fonte: arquivo pessoal, 2025

4.2.2 Análise do Ph dos solos

Pesou-se 10 g dos solos 1 em uma balança analítica e adicionou-se 25 mL de água destilada. A solução resultante foi agitada por 20 minutos até se formar uma mistura homogênea e foi deixada em repouso por 4 horas. Após esse período, o pH das soluções dos dois tipos de solo foi medido utilizando um pHmetro e fita de pH para garantir uma melhor precisão dos dados. O procedimento foi realizado em triplicata.

4.3 Semeadura das sementes para obtenção do material vegetal

As sementes de milho (*Zea mays L.*) utilizadas nesta pesquisa foram fornecidas pelo Instituto de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER) do município de Princesa Isabel. Antes da semeadura, passaram por um processo de desinfecção em solução de hipoclorito de sódio a 2% por 10 minutos e, posteriormente, foram imersas em água destilada por 2 horas para estimular a germinação e promover um crescimento mais uniforme. (Figura 3)

A semeadura foi realizada em copos plásticos contendo uma mistura de areia lavada e vermiculita, mantidos em câmara de germinação e irrigados com solução nutritiva de Norris (Tabela 1) (Norris & Data, 1976). Após 14 dias do plantio (DAS), 20 plantas de tamanho uniforme foram transferidas para saquinhos de mudas contendo o tipo de solo em análise, onde continuaram recebendo irrigação com a mesma solução nutritiva

Tabela 1: Solução nutritiva para crescimento de plantas (Norris & Data, 1976)

Solução Estoque	Produto Químico	Concentração (g·L⁻¹)	mL da Sol. Estoque·L⁻¹ da Sol. Final
1	KCl	29,8	2,5
2	KH ₂ PO ₄	4,35	2,5
3	MgSO ₄ ·7H ₂ O	98,6	2,5
4	Micronutrientes:		0,5
	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0,078	
	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0,22	
	MnSO ₄ ·H ₂ O	2,03	
	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	0,01	

	H_3BO_3	1,43	
5	Citrato férrico	1,795	1,0
6	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	68,0	1,0

Fonte: adaptado Norris & Data, 1976

Figura 3- Processos metodológicos da semeadura das sementes para obtenção do material vegetal



fonte: arquivo pessoal,2025

4.4 Aplicação do estresse com nitrato de chumbo

A submissão das plantas ao estresse com nitrato de chumbo foi iniciada aos 20 dias após a semeadura, com a aplicação de doses de 0,5 mM de nitrato de chumbo $[Pb(NO_3)_2]$, diluído na solução nutritiva, sempre que era necessária a irrigação. Essa concentração foi escolhida com base no estudo de Fontenele et al. (2017), que demonstrou ser suficiente para induzir estresse nas plantas sem levá-las à morte (Figura 4). Paralelamente, um grupo de plantas permaneceu sendo regada com solução nutritiva sem adição de nitrato de chumbo $[Pb(NO_3)_2]$, as quais formaram o que se denominou o grupo controle.

Figura 4: Plantas de milho sendo submetidas ao estresse com nitrato de chumbo a 0,5 mM, lado esquerdo controle e direito e estresse.



Fonte: arquivo pessoal,2025

O delineamento experimental adotado nesta pesquisa foi inteiramente casualizado, com dois tratamentos (controle e estresse por chumbo), cada um com quatro repetições biológicas. Cada repetição foi composta por três plantas, totalizando 12 plantas por tratamento e 24 plantas no total. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando identificadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, com o auxílio do software GraphPad Prism (versão 8).

4.5 Análises dos parâmetros de crescimentos e bioquímicos

4.5.1 Coleta do material vegetal e análise de crescimento

Vinte dias após o início da aplicação do estresse com nitrato de chumbo [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$] quatro plantas do solo (controle/estresse) foram coletadas individualmente, separando-se a parte aérea (folha + caule) e as raízes. O material vegetal foi colocado em sacos de papel e armazenado em estufa com circulação de ar a 70 °C por 24 horas. Após a secagem completa, foram determinadas as massas secas da parte aérea (MSPA) e das raízes (MSR), cujos valores foram utilizados para calcular a massa seca total (MST).

4.5.2 Vazamento de eletrólitos (VE)

O vazamento de eletrólitos (integridade celular) foi avaliado conforme a metodologia descrita por Shanahan et al. (1990). Foram retirados cinco discos foliares de cada tratamento, e incubados em tubos de ensaio com 10 mL de água destilada. Os tubos permaneceram sob agitação suave a 25 °C durante 24 horas. Após esse período, foi medida a condutividade elétrica (CE) da solução (CE1). Em seguida, os tubos foram incubados em banho-maria a 100 °C por 1 hora e, após retornarem à temperatura ambiente, a condutividade elétrica da solução foi novamente determinada (CE2). Os danos nas membranas celulares (DM), expressos em porcentagem, foram calculados pela fórmula: $\text{DM} = (\text{CE1}/\text{CE2}) \times 100$.

4.6 Efeitos antioxidantes nas plantas

4.6.1 Extratos enzimáticos

Os extratos vegetais foram obtidos a partir da maceração de 200 mg de tecido vegetal na presença de 50% de polivinilpolipirrolidona (PvPP), seguido da homogeneização em 1,8 mL da solução tampão de extração, composta por fosfato de potássio 100 mM (pH 7,8), EDTA 0,1 mM e ácido ascórbico 10 mM, conforme as recomendações de DEUNER et al., (2010). Os extratos obtidos foram centrifugados a $12.000 \times g$, durante 15 min, a 4 °C, e o sobrenadante foi coletado e armazenado a -20 °C para posteriores análises (Figura 5).

Figura 5- Processos metodológicos para obtenção dos extratos enzimáticos



Fonte: arquivo pessoal,2025

4.6.2 Peroxidação Lipídica

A peroxidação lipídica das membranas celulares foi determinada por meio da quantificação dos níveis de malondialdeído (MDA), utilizando o método das substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) (HEATH; PACKER, 1968; Saraiva, 2017). Para a análise, alíquotas de 0,5 mL do extrato foram misturadas com 1,5 mL de TBA (0,5%) dissolvido em TCA (ácido tricloroacético) (20%). O homogeneizado foi incubado em banho-maria a 90 °C por 20 minutos, e a reação foi interrompida imediatamente em banho de

gelo. Em seguida, as amostras foram centrifugadas a $10.000 \times g$ por 5 minutos, e os sobrenadantes coletados foram analisados por absorvância a 532 e 600 nm. (Figura 6) As concentrações de MDA foram determinadas pela subtração das leituras espectrométricas ($A_{532} - A_{600}$), utilizando o coeficiente de extinção molar ($155 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$).

Figura 6- Processos metodológicos para a etapa de Peroxidação Lipídica



Fonte: arquivo pessoal,2025

4.6.3 Peroxidase de ascorbato

A determinação da funcionalidade da peroxidase do ascorbato (APX) foi realizada conforme a metodologia adaptada de Nakano e Asada (1981); e Saraiva (2017). A reação enzimática foi conduzida em uma solução composta por uma mistura contendo $25 \mu\text{L}$ do

extrato enzimático, tampão fosfato monossódico a 50 mM, pH 6,0, EDTA a 0,05 mM, ascorbato a 0,015 M e peróxido de hidrogênio a 0,03 M. A atividade da APX foi acompanhada pela conversão do ascorbato a 350 nm e mensurada utilizando o coeficiente de absorção molar de $2,8 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$. Os resultados foram expressos em $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ de proteína.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características físicas-químicas dos solos analisados

O ensaio granulométrico realizado na amostra do solo revelou uma distribuição variada das partículas, indicando uma diversidade significativa em sua composição granulométrica. A análise dos resultados permitiu concluir que o solo é predominantemente composto por partículas de tamanho médio, o que é corroborado pela presença expressiva tanto de partículas finas quanto grossas, apontando para uma estrutura heterogênea.

Essa distribuição das partículas tem implicações diretas nas propriedades físicas do solo, como sua permeabilidade, capacidade de retenção de água e absorção de nutrientes. De acordo com Lima et al. (2017), a composição granulométrica influencia fortemente essas características, sendo determinante para o manejo adequado do solo, principalmente em sistemas agrícolas.

O solo 1 apresentou predominância de partículas de argila, conforme os dados da Tabela 3, com 60% de argila e 20% de silte na amostra analisada. Essa composição indica uma elevada capacidade de retenção de água, além de uma maior propensão à compactação, o que pode comprometer a aeração do solo e reduzir a disponibilidade de oxigênio para as raízes das plantas (SOUZA et al., 2015). Apesar dessas limitações, essas características podem ser vantajosas para culturas como o milho, que se beneficiam de solos com boa capacidade de retenção hídrica e distribuição equilibrada de umidade nas camadas superficiais (BARROS et al., 2019).

Tabela 3: Composição Granulométrica por peneiramento DNER-ME 080/94 do solo 1

Tipo de Solo	Argila (%)	Silte (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)
Solo 1	60	20	10	3,5	5

Os resultados das análises químicas do solo indicaram que, de modo geral, o pH apresentou valores próximos à neutralidade, sendo classificado como ligeiramente ácido, com pH de 6,2 (Tabela 4). Em solos com pH ácido, uma das principais limitações agronômicas é a menor disponibilidade de nutrientes essenciais, como fósforo (P) e molibdênio (Mo), além do aumento na solubilidade e conseqüente toxicidade de elementos como alumínio (Al^{3+}) e manganês (Mn^{2+}), o que pode comprometer o desenvolvimento das plantas (Ghelen, 2023)

A faixa de pH ideal para as plantas pode variar conforme a espécie, com algumas culturas preferindo solos com pH em torno de 6,0, enquanto outras necessitam de condições mais ácidas. Segundo Balerini (2016), o pH do solo tem grande influência no crescimento das plantas, uma vez que afeta a absorção de nutrientes, sendo a faixa de pH considerada ideal para muitas culturas variações entre 5,5 e 7,0.

Tabela 4: Características químicas dos solos: potencial hidrogeniônico (pH)

Tipo de Solo	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3
Solo 1	6,2	6,3	6,2

5.2 Aspectos visuais das plantas de milho submetidas ao estresse com nitrato de chumbo

Nas Figuras 7, são apresentados os aspectos visuais das plantas de milho cultivadas nos solos 1, que foram submetidas ao estresse induzido pelo nitrato de chumbo. A imagem exhibe claramente os dois grupos: o grupo controle (lado esquerdo) e o grupo sob estresse (lado direito). De forma geral, após 20 dias de exposição ao nitrato de chumbo a 0,5 mM, as plantas exibiram sinais evidentes de toxicidade ao Pb, como a inibição do crescimento, o aparecimento de manchas no limbo foliar, abscisão das folhas e o amarelecimento foliar. Esses sintomas são característicos das respostas fisiológicas ao estresse causado por metais pesados, que podem interferir diretamente nos processos metabólicos vitais das plantas, conforme discutido por vários autores (Gomes et al., 2017; Lima et al., 2018).

A clorose foliar observada, um dos sintomas mais visíveis, pode estar associada a alterações fisiológicas resultantes da degradação da clorofila, um processo que ocorre devido ao desbalanço nutricional, principalmente na absorção de magnésio (Mg) e ferro (Fe), como sugerido por Silva (2015). Esse fenômeno é frequentemente agravado pela ativação da enzima clorofilase, que acelera a degradação da clorofila e compromete a capacidade fotossintética das plantas, impactando negativamente seu crescimento e desenvolvimento (Silva, 2015; Gomes et al., 2017).

Figura 7- Plantas de milho cultivadas no solo coletado na propriedade de Chico Evaristo

(Solo 1). Durante a fase de submissão do estresse, plantas foram regadas com solução nutritiva contendo $[Pb(NO_3)_2]$ 5 mM (Grupo tratado) e outro grupo de plantas recebeu apenas solução nutritiva (Grupo controle)



fonte: arquivo pessoal da autora, 2025

5.3 Parâmetros de crescimento: produção de biomassa (MSPA, MSR, MST)

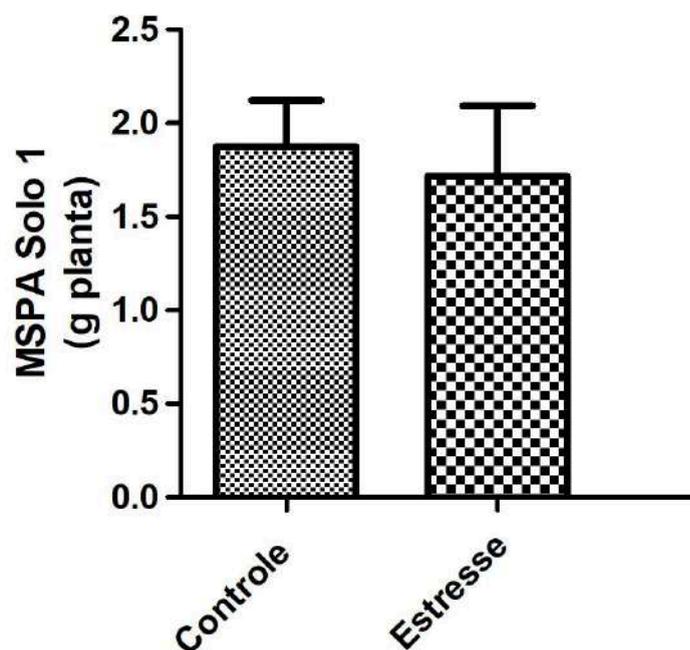
5.3.1 Massa seca da parte Aérea (MPA)

A exposição de plantas de milho a soluções contendo $[Pb(NO_3)_2]$ a 5 mM provocou uma redução significativa no crescimento da parte aérea, em comparação ao grupo controle. Os dados obtidos indicaram uma média de diminuição de 8,61% na massa seca da parte aérea sob estresse por chumbo, sendo que a primeira amostra apresentou uma redução expressiva de 57,47%. Esses resultados evidenciam o efeito tóxico variável do chumbo (Pb) sobre o desenvolvimento das plantas (Figura 8).

A fotossíntese, processo central para o crescimento e acúmulo de biomassa, é amplamente reconhecida como uma das vias mais sensíveis à toxicidade de metais pesados. Fontenele (2015) descreve que o chumbo compromete a eficiência fotossintética por meio da distorção da ultraestrutura dos cloroplastos, da inibição de enzimas essenciais às reações luminosas e ao ciclo de Calvin, além da redução na síntese de pigmentos fotossintéticos. Esses danos estruturais e enzimáticos comprometem diretamente a capacidade da planta de captar energia solar e assimilá-la na forma de carboidratos, o que repercute negativamente na sua taxa de crescimento.

Adicionalmente, os metais pesados como o Pb interferem em diversas funções metabólicas cruciais ao desenvolvimento vegetal. Souza et al. (2019) relatam que o chumbo afeta diretamente a atividade de enzimas como a Rubisco, prejudicando a fixação de CO₂ e, conseqüentemente, a produção de matéria orgânica. Lima et al. (2018) complementam que o Pb pode ainda comprometer a integridade das membranas celulares e inibir reações bioquímicas fundamentais, desencadeando desequilíbrios metabólicos que impactam a nutrição, o crescimento e até a reprodução das plantas.

Figura 8. Massa seca da parte aérea (MSPA) de plantas de milho cultivadas no solo 1 em diferentes tipos de solos e regadas com solução nutritiva na ausência (controle) e presença de [Pb(NO₃)₂] a 5 mM (estresse). SAs diferenças significativas entre os tratamentos estão indicadas no gráfico, conforme determinado pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os dados representam a média de três repetições \pm erro padrão.



Fonte: arquivo pessoal da autora, 2025.

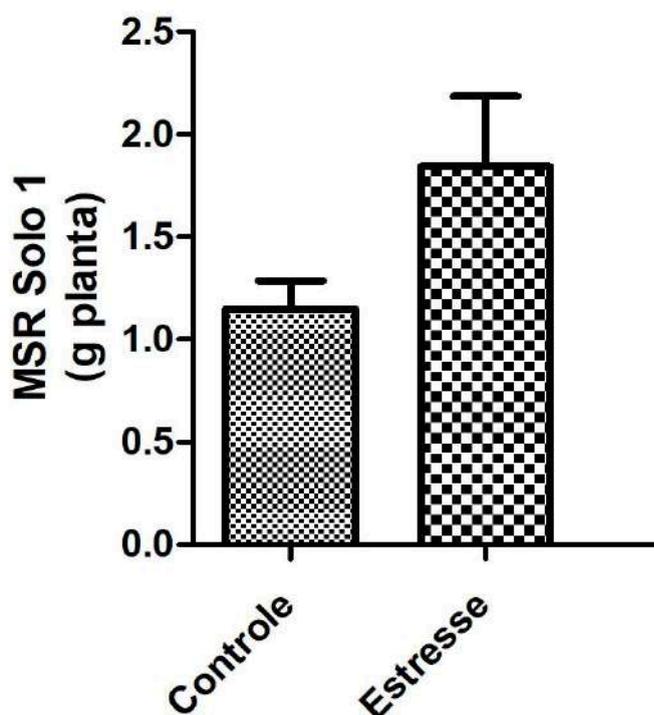
5.3.2 Massa seca da Raiz (MSR)

Nas raízes, assim como na parte aérea, foi constatada uma variação significativa no crescimento das plantas de milho cultivadas no solo 1 sob estresse induzido por $[Pb(NO_3)_2]$ (Figura 9). Os dados demonstram que a exposição ao chumbo impactou de forma expressiva os parâmetros avaliados, resultando em um aumento médio de 60,34% em comparação ao grupo controle. Essa elevação sugere uma resposta fisiológica acentuada ao agente estressor, possivelmente relacionada à ativação de mecanismos de defesa ou ao acúmulo de metabólitos associados ao estresse oxidativo.

Essa resposta pode ser atribuída ao fato de que as raízes representam os principais sítios de bioacumulação do chumbo, o que pode comprometer o balanço hídrico e hormonal da planta, interferindo diretamente na absorção de água e nutrientes essenciais para o desenvolvimento vegetal (Blaylock; Huang 2000). Consequentemente, esse comprometimento nas funções radiculares desencadeia uma redução tanto no crescimento das raízes quanto da parte aérea das plantas, refletindo-se em prejuízos ao desenvolvimento geral (Pereira, 2013).

Figura 9. Massa seca da raiz (MSR) de plantas de milho cultivadas no solo 1 regadas com solução nutritiva na ausência (controle) e presença de $[Pb(NO_3)_2]$ a 5 mM

(estresse). As diferenças significativas entre os tratamentos estão indicadas no gráfico, conforme determinado pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os dados representam a média de três repetições \pm erro padrão.



. fonte: arquivo pessoal da autora, 2025

O acúmulo de metais pesados nas raízes é um fenômeno frequente em plantas expostas a ambientes contaminados, sendo a extensão desse acúmulo diretamente relacionada à integridade funcional do sistema radicular. Quando as raízes mantêm suas funções primárias como a absorção de água e nutrientes e apresentam baixa translocação de chumbo (Pb) para a parte aérea, as plantas podem ativar mecanismos fisiológicos de tolerância ou escape à toxicidade do metal.

Estudos realizados por Soares et al. (2001) e Seregin et al. (2004) demonstram que essa retenção radicular do Pb atua como uma estratégia adaptativa eficiente, minimizando os efeitos fitotóxicos nas folhas e demais estruturas sensíveis da parte aérea. Esses mecanismos são fundamentais para a sobrevivência das plantas em solos contaminados, pois promovem a compartimentalização e o sequestro do metal em compartimentos menos sensíveis, como a parede celular e a vacúola das células radiculares. Essa capacidade de restringir a mobilidade do chumbo no interior do vegetal reduz os impactos negativos sobre os processos metabólicos essenciais e o crescimento vegetal (Garcia et al., 2016).

Nesse contexto, o milho (*Zea mays* L.) tem se destacado como uma planta com elevado potencial para aplicação em processos de fitorremediação. Trata-se de uma cultura que combina atributos agronômicos vantajosos como rápido crescimento, elevada produção de biomassa e ampla adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas com uma capacidade comprovada de absorver e acumular metais pesados, especialmente nos tecidos radiculares. Essa característica o torna particularmente eficiente na estabilização ou extração de contaminantes do solo.

Freitas et al. (2013) evidenciaram o potencial do milho em estudos realizados com solos contaminados por chumbo, demonstrando que, mesmo sob condições de estresse químico, a planta manteve desempenho satisfatório em termos de crescimento e desenvolvimento. Diante disso, o uso do milho em estratégias de fitorremediação representa uma alternativa economicamente viável e ambientalmente sustentável para a reabilitação de áreas degradadas por metais pesados.

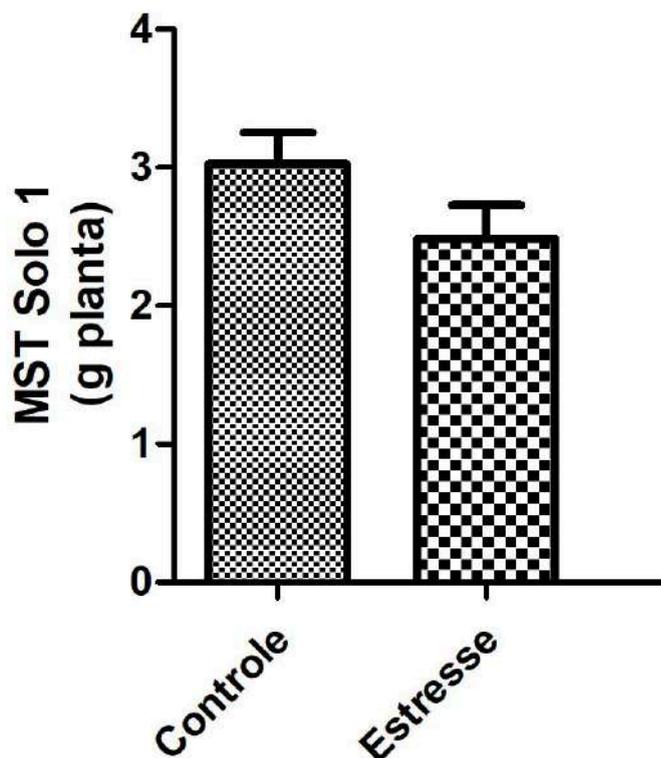
5.3.3 Massa seca Total (MST)

A análise da Figura 10 revela que a presença de chumbo (Pb) exerceu um impacto significativamente negativo sobre a produção de biomassa das plantas avaliadas. Esse efeito fitotóxico está fortemente associado à inibição do processo fotossintético, desencadeada pelo aumento na geração de espécies reativas de oxigênio (EROs), conforme relatado por Pourrut et al. (2011).

No conjunto dos dados analisados, observa-se que a primeira amostra submetida ao estresse apresentou uma redução expressiva de 37,77% em relação ao controle, evidenciando forte impacto da toxicidade do Pb. A segunda amostra apresentou uma diminuição mais moderada (15,56%), enquanto a terceira revelou um leve aumento (4,21%), possivelmente refletindo mecanismos fisiológicos de tolerância ou variações individuais entre as plantas analisadas.

Essas diferenças podem ser explicadas pela intensidade do estresse oxidativo, promovido pelo acúmulo excessivo de EROs em tecidos vegetais expostos a metais pesados como o chumbo. Esse acúmulo interfere diretamente na integridade e funcionalidade dos fotossistemas I e II, prejudica a cadeia de transporte de elétrons e compromete as membranas dos tilacoides, resultando em menor eficiência fotossintética e, conseqüentemente, em redução do crescimento e desenvolvimento vegetal (Pourrut et al., 2011; Sharma; Dubey, 2005; Bomfim, 2020).

Figura 10 . Massa seca total (MST) de plantas de milho cultivadas no solo 1 regadas com solução nutritiva na ausência (controle) e presença de $[Pb(NO_3)_2]$ a 5mM (estresse). As diferenças significativas entre os tratamentos estão indicadas no gráfico, conforme determinado pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os dados representam a média de três repetições \pm erro padrão.



Fonte: arquivo pessoal da autora, 2025

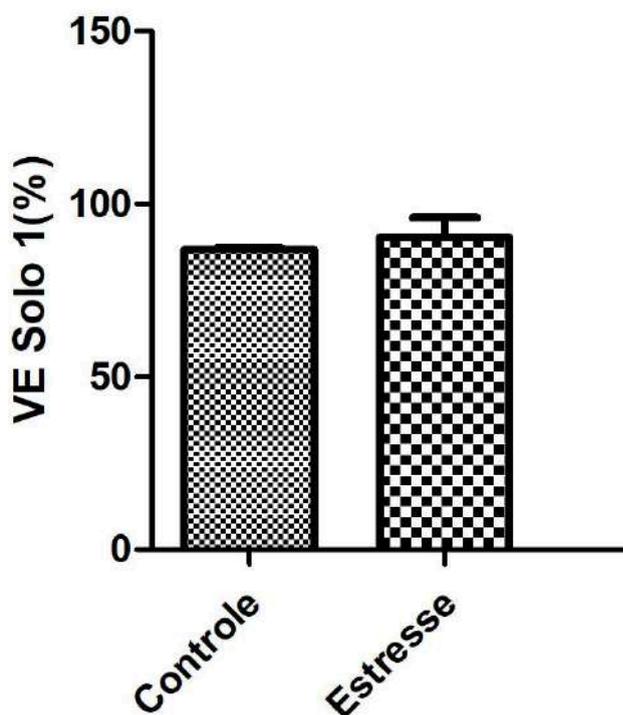
5.4. Parâmetros bioquímicos: Danos oxidativos

A extensão dos danos oxidativos nas plantas foi avaliada por meio da análise da integridade das membranas celulares, utilizando-se a metodologia de quantificação do vazamento de eletrólitos (VE). Esse parâmetro é amplamente reconhecido como um indicador indireto da peroxidação lipídica e da perda de integridade da membrana plasmática em condições de estresse abiótico (Lima, 2013; Dionisio-Sese & Tobita, 1998).

A análise dos valores de VE (variação eletrolítica) entre as plantas de milho submetidas ao estresse por chumbo (Pb) revelou comportamentos distintos entre as amostras.

Na primeira amostra, observou-se uma redução de 9,37% em relação ao controle, possivelmente indicando que houve menor liberação de eletrólitos, o que pode refletir menor dano às membranas celulares ou até uma resposta adaptativa à exposição inicial ao metal. Por outro lado, as amostras dois e três apresentaram aumentos de 13,45% e 8,18%, respectivamente, evidenciando maior comprometimento da integridade das membranas, um indicativo típico de estresse oxidativo causado pelo acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) em decorrência da toxicidade do Pb (Figura 11).

Figura 11- Vazamento de eletrólitos (VE) de plantas de milho cultivadas no solo 1 regadas com solução nutritiva na ausência (controle) e presença de [Pb(NO₃)₂] a 5 mM (estresse).As diferenças significativas entre os tratamentos estão indicadas no gráfico, conforme determinado pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os dados representam a média de três repetições \pm erro padrão.



Fonte: arquivo pessoal da autora, 2025

Esse comportamento é consistente com os mecanismos descritos por Pourrut et al. (2011), que destacam que o excesso de EROs, induzido pela presença de metais pesados, leva à peroxidação lipídica e consequente perda de seletividade das membranas, aumentando a liberação de eletrólitos. Essa resposta pode variar de acordo com o estágio de desenvolvimento da planta, a capacidade de ativação dos sistemas antioxidantes e as

propriedades do solo, como disponibilidade de nutrientes e pH (Kabata-Pendias, 2011; Bomfim, 2020). Dessa forma, os resultados obtidos sugerem que, embora o estresse por Pb possa comprometer a integridade celular, há variabilidade na resposta fisiológica das plantas, o que pode indicar mecanismos de tolerância ou escape ao estresse oxidativo.

O aumento do dano oxidativo pode ser atribuído à intensificação da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) induzidas pela presença de Pb, o que compromete a estrutura e a permeabilidade da membrana celular, alterando o balanço iônico e prejudicando a absorção de nutrientes (Lima, 2013; Sharma & Dubey, 2005). Conseqüentemente, o estresse oxidativo reduz a eficiência fotossintética e a produção de matéria seca, limitando o crescimento vegetal (Møller et al., 2007; Chaves et al., 2009).

5.5 Efeitos antioxidantes nas plantas

5.5.1 Peroxidação Lipídica

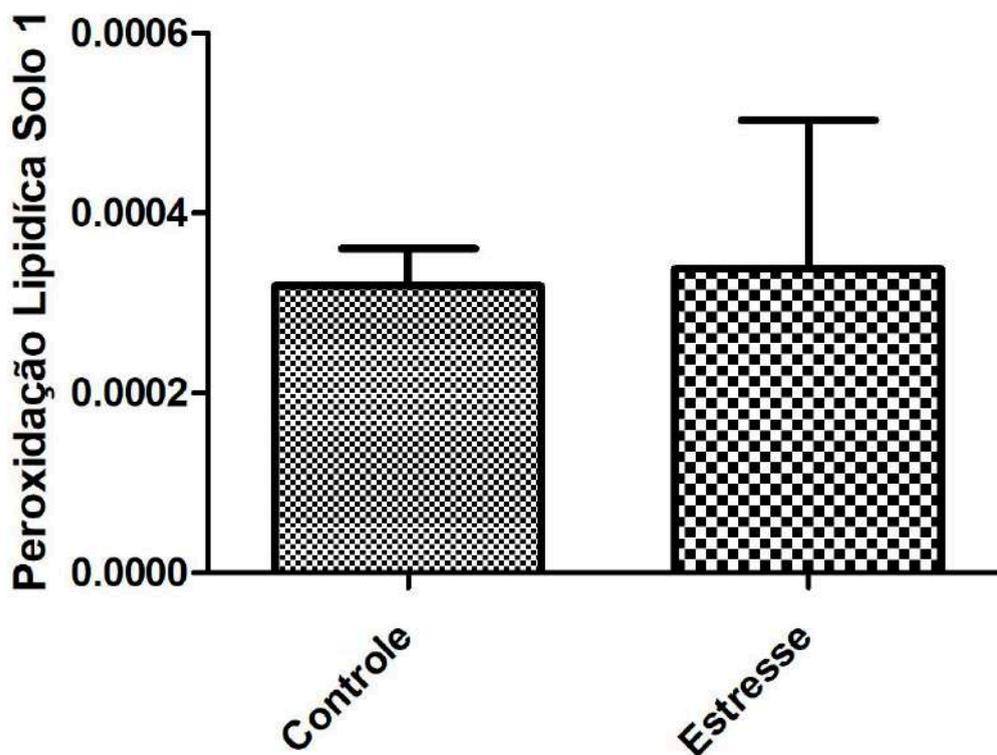
Para avaliar os danos oxidativos decorrentes dos tratamentos com chumbo, foram quantificados os níveis de peroxidação lipídica em plantas de milho cultivadas no solo 1. Essa análise é fundamental, pois permite verificar os impactos do estresse oxidativo sobre a integridade das membranas celulares, uma vez que a peroxidação de lipídeos é um dos principais indicadores de danos oxidativos em tecidos vegetais. Os resultados obtidos, apresentados na Figura 12, evidenciam variações nos níveis de peroxidação lipídica entre os dois grupos experimentais analisados.

Notoriamente, a aplicação de nitrato de chumbo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) não resultou em um aumento significativo nos níveis de peroxidação lipídica nas plantas cultivadas no solo 1. Uma possível explicação para esse comportamento é que, nos tratamentos com adição de chumbo, observou-se uma redução da massa seca total (MST), conforme ilustrado na Figura 10. Isso sugere uma menor biomassa celular disponível, o que, por consequência, pode indicar uma menor quantidade de lipídeos nas células dessas plantas. Assim, a menor peroxidação lipídica pode também refletir a própria redução do conteúdo lipídico, e não necessariamente a ausência de estresse oxidativo.

Além disso, em um dos grupos avaliados, observou-se um aumento de aproximadamente 39,52% nos níveis de peroxidação lipídica sob estresse em relação ao controle. Esse incremento pode estar associado à ativação de mecanismos compensatórios por parte das plantas, como o aumento na atividade de enzimas antioxidantes ou o acúmulo de metabólitos secundários respostas fisiológicas comumente observadas em condições adversas

(Gill; TutejaUTEJA, 2010). A resposta variável entre os grupos reforça a complexidade da interação entre o estresse causado por metais pesados e a fisiologia vegetal, que pode ser modulada por fatores como o tipo de solo, a intensidade do estresse, o tempo de exposição e o estágio de desenvolvimento das plantas.

Figura 12. Peroxidação Lipídica comparando entre o solo 1 tratamento grupo controle e estresse. As diferenças significativas entre os tratamentos estão indicadas no gráfico, conforme determinado pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os dados representam a média de três repetições \pm erro padrão.



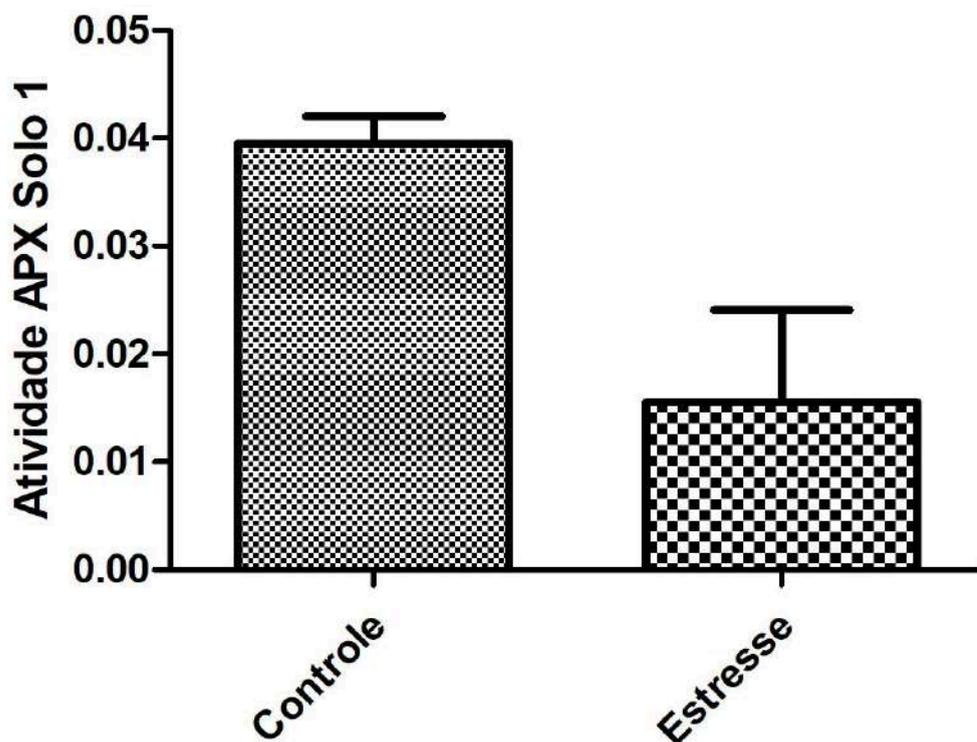
Fonte: arquivo pessoal da autora, 2025

5.5.2 Atividade APX

A atividade da enzima ascorbato peroxidase- APX (Figura 13), evidencia respostas fisiológicas distintas nas plantas de milho cultivadas no solo. A APX é uma enzima antioxidante essencial no sistema de defesa das plantas, desempenhando um papel crucial na desintoxicação do peróxido de hidrogênio (H_2O_2), uma das principais espécies reativas de oxigênio (EROs) geradas sob condições de estresse abiótico, como a presença de metais

pesados (Shigeoka et al., 2002; Gill; Teteja, 2010). A intensificação da atividade da APX em ambientes mais contaminados sugere um mecanismo adaptativo das plantas frente ao aumento do estresse oxidativo, atuando na proteção das estruturas celulares contra os danos provocados pelo acúmulo de H_2O_2 . (Farghly; Hammad, 2016). Esse comportamento indica não apenas a ativação das vias antioxidantes, mas também reforça a sensibilidade bioquímica da APX como biomarcador do grau de estresse ambiental ao qual as plantas estão submetidas.

Figura 13: Atividade da enzima ascorbato peroxidase- APX retratando as curvas dos danos comparados entre os solo 1 grupo controle e estresse. As diferenças significativas entre os tratamentos estão indicadas no gráfico, conforme determinado pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os dados representam a média de três repetições \pm erro padrão.



Fonte: arquivo pessoal da autora, 2025

Observa-se que, nas condições de controle, as plantas apresentaram níveis basais relativamente baixos de atividade da enzima ascorbato peroxidase (APX), o que indica um ambiente fisiológico estável, com baixa produção de espécies reativas de oxigênio (EROs). No entanto, sob estresse induzido pela aplicação de nitrato de chumbo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$), foi registrada uma elevação expressiva na atividade da APX.

Esse aumento na atividade enzimática sugere que as plantas de milho submetidas ao estresse estão sob maior pressão oxidativa, o que desencadeia uma intensificação da resposta antioxidante, especialmente do sistema enzimático. De acordo com Mitter (2002), essa ativação é uma estratégia essencial para mitigar os efeitos danosos das EROs geradas em excesso. A elevação na atividade da APX torna-se, portanto, fundamental para preservar a integridade das membranas celulares e garantir o funcionamento adequado do metabolismo fotossintético (Yadaw, 2010).

Nesse contexto, os achados do presente estudo corroboram pesquisas anteriores que destacam o papel central da ascorbato peroxidase na resposta adaptativa ao estresse por metais pesados, reforçando sua relevância como marcador bioquímico da condição de estresse ambiental (Nawaz et al., 2020; Zhou et al., 2019).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que:

- O Nitrato de chumbo causou redução da massa seca da parte aérea, raiz e total das plantas estressadas por nitrato de chumbo;
- Houve um aumento no vazamento de eletrólitos (VE) em resposta ao estresse;
- A Peroxidação lipídica não aumentou proporcionalmente devido à menor biomassa;
- A resposta da APX indica tentativa de proteção celular e manutenção da fotossíntese;
- A qualidade do solo influencia diretamente as respostas fisiológicas das plantas;
- O milho (*Zea mays* L.) tem se destacado como uma planta com elevado potencial para aplicação em processos de fitorremediação;
- É urgente monitorar e remediar solos contaminados para preservar a agricultura e o meio ambiente;
- Este estudo contribuiu significativamente para a consolidação dos conhecimentos adquiridos durante o curso de licenciatura em ciências biológicas.

REFERÊNCIAS

- ADRIANO, D. C. Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals. Springer, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14724:2023 – Informação e documentação: Trabalhos acadêmicos – Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ALLOWAY, B. J. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. Springer Science & Business Media, 2013.
- AZEVEDO, F. A.; CHASIM, A. A. M. *Metais: Gerenciamento da toxicidade*. São Paulo: Atheneu Editora/InterTox, 2003. 554 p.
- BARBOSA, Kiriaque Barra Ferreira et al. Estresse oxidativo: conceito, implicações e fatores modulatórios. *Revista de Nutrição*, v. 23, p. 629-643, 2010.
- BARBOSA, Marta Ribeiro et al. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. *Ciência Rural*, v. 44, p. 453-460, 2014.
- BIGHE, Kelly Nery. Fitorremediação induzida de chumbo com feijão de porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC.). Espírito Santo, 2016.
- BOMFIM, L. Efeitos de metais pesados na fisiologia vegetal. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Federal da Paraíba.
- BOSCOLO, P. R. S.; MENOSSI, M.; JORGE, R. A. Aluminum induced oxidative stress in maize. *Phytochemistry*. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(02\)00491-0](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(02)00491-0). Acesso em: 01 jan. 2025.
- BRADL, H. B. Heavy metals in the environment: origin, interaction and remediation. Elsevier, 2005.
- BLAYLOCK, M.; HUANG, J. Pb uptake, toxicity, and detoxification in plants. *Plant Soil*, 2007. Disponível em: PubMed PMID: 21541849. Acesso em: jun. 2025.
- BRITO, Marcos Eric Barbosa et al. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. *Bioscience Journal*, v. 29, n. 5, p. 1244-1254, 2013.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro – grãos: nono levantamento, junho 2010. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2010.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. *8º Levantamento da Safra de Grãos 2024/25*. Brasília: Conab, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br> (acesso em: maio de 2025).

CHAVES, C. L. Avaliação das concentrações de metais pesados em áreas de deposições de lixo. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Rondônia. Acesso em: 10 nov. 2024.

DESSUY, Morgana Bazzan. Desenvolvimento de estratégias analíticas usando espectrometria de absorção atômica para avaliar a composição de copos de liga peltre e lixiviação de cádmio, chumbo e antimônio. 2011.

DIONISIO-SESE, M. L.; TOBITA, S. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant Science*, v. 135, n. 1, p. 1-9, 1998.

DIAS, L. C. et al. Resposta antioxidante de plantas de milho submetidas ao estresse por metais pesados. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 42, n. 3, p. 512–520, 2019.

DIAS, M. C. et al. Oxidative stress and damage in plants by metal(loid)s: An overview of physiological and biochemical mechanisms. *Environmental and Experimental Botany*, v. 161, p. 98–123, 2019.

DUBEY, R. Toxicidade de chumbo em plantas. Brasília: *Journal of Plant Physiology*, v. 17, n. 1, p. 35–52, 2005. Acesso em: 12 nov. 2024.

DHINDSA, R. S. et al. Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental Botany*, v. 32, n. 1, p. 93–101, 1981.

EMBRAPA – Agência de Informação Embrapa. O milho *Zea mays* L. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/>. Acesso em: 09 dez. 2024.

EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2017.

EMBRAPA. *Milho no Brasil: origem e histórico de cultivo*. 2. ed. 2017. Disponível em: <https://encurtador.com.br/gikqI>. Acesso em: 20 mar. 2025.

FONTENELE, Nila Maria Bezerril. Efeitos do chumbo em cultivares de *Vigna unguiculata* L. Walp: abordagem bioquímica, fisiológica e molecular. 2015. 145 f. Tese (Doutorado em Bioquímica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

FARGHALY, F. A. M.; HAMMAD, S. A. R. Physiological and biochemical studies on the effect of heavy metals on *Zea mays* plants. *Middle East Journal of Agriculture Research*, v. 5, n. 4, p. 673–683, 2016.

FREITAS, G. A. de; CORRÊA, R. X.; SANTOS, F. S. dos. Potencial de *Zea mays* L. na fitorremediação de solos contaminados por metais pesados. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 44, n. 2, p. 371–379, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000200026>. Acesso em: 20 jul. 2025.

FILGUEIRAS, Tarciso S. O conceito de fruto em gramíneas e seu uso na taxonomia da família. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, p. 93-100, 1986.

GAO, S. et al. Effects of copper on growth, antioxidant enzymes and photosynthesis in cucumber plants. *Environmental and Experimental Botany*, v. 67, n. 1, p. 112-117, 2010.

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, 2010.

GRATÃO, P. L. et al. Antioxidant enzyme activities in tomato plants under stress conditions. *Scientia Agricola*, v. 62, n. 4, p. 364–368, 2005.

GHELEN, João Arthur Bringhenti. Avaliação da correção do pH e da aplicação de nutrientes no desenvolvimento da oliveira em dois solos ácidos de xisto e granito. 2023. Dissertação (Mestrado) – Instituto Politécnico de Bragança (Portugal).

GRIGOLETTO, T. L. B. Chumbo na água de consumo de Ribeirão Preto (SP): fatores químicos, físicos e possíveis correlações com a contaminação de crianças. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GUPTA, D. K., NICOLOSO, F.T., SCHETINGER, M.R.C., ROSSATO, L.V., PEREIRA,

L.B., CASTRO, G.Y., SRIVASTAVA, S., TRIPATHI, R.D. Antioxidant defense mechanism in hydroponically grown *Zea mays* seedlings under moderate lead stress. *Journal of Hazardous Materials* v.172, p. 479–484. 2009

GARCÍA, J. S. et al. Physiological responses of plants to heavy metals: Mechanisms of tolerance and remediation. *Environmental Chemistry Letters*, v. 14, n. 1, p. 1–18, 2016.

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, 2010.

GOMES, Krishna R. et al. Respostas de crescimento e fisiologia do milho submetido a estresse salino com diferentes espaçamentos de cultivo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, p. 365-370, 2011.

GRATÃO, P. L. et al. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. *Functional Plant Biology*, v. 32, n. 6, p. 481-494, 2005.

HEATH, R. L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, v. 125, p. 189–198, 1968.

JESUS, L. R. B.; BATISTA, B. L.; LOBATO, A. K. da S. O silício reduz o acúmulo de alumínio e mitiga os efeitos tóxicos nas plantas de feijão-caupi. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2017. DOI: 10.1007/s11738-017-2435-4. Acesso em: 09 out. 2024.

JONES, D. L. et al. Spatial coordination of aluminium uptake, production of reactive oxygen species, callose production and wall rigidification in maize roots. *Plant, Cell & Environment*, v. 29, n. 7, p. 1309–1318, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01509.x>. Acesso em: 01 jan. 2025.

KABATA-PENDIAS, A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. CRC Press, 2011.

KANG, Jian; PENG, Yunfeng; XU, Weifeng. *Crop Root Responses to Drought Stress: Molecular Mechanisms, Nutrient Regulations, and Interactions with Microorganisms in the Rhizosphere*. *International Journal of Molecular Sciences*, [S.l.], v. 23, n. 16, p. 9310, 18 ago. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/23/16/9310>. Acesso em: 27 jun.

2025.

LE GUÉDARD, M.; FAURE, O.; BESSOULE, J-J. Mudanças iniciais na composição de ácidos graxos dos lipídios fotossintéticos da membrana de *Populus nigra* cultivada em um aterro metalúrgico. *Quimosfera*, 2012.

LIMA, F. S. et al. Bioconcentração de chumbo e micronutrientes em hortaliças cultivadas em solo contaminado. *Revista de Agrônômica*, 2013.

LIMA, M. de F. et al. Sistema antioxidante em plantas: mecanismos de defesa contra o estresse oxidativo. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, v. 3, n. 1, p. 103–111, 2013.

LIMA, G. P. P. Efeitos do estresse por metais pesados em plantas: mecanismos de tolerância. *Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas*, v. 7, n. 1, p. 20-34, 2013.

LOPES, M. J. C. Oxidação proteica e peroxidação lipídica em plantas de diferentes ciclos de seleção do milho ‘Saracura’, sob encharcamento contínuo. 2005. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/30904/1/Oxidacao-proteica.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2024.

LUSHCHAK, V. I. Free radicals, reactive oxygen species, oxidative stress and its classification. *Chemico-Biological Interactions*, v. 224, p. 164–175, 2014.

LARCHER, W. *Fisiologia vegetal*. 5. ed. São Carlos: Rima, 2006.

MANUAL de redação: Agência Senado, Jornal do Senado. Brasília: Senado Federal, 2023. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/notici/contaminacao-por--pode-causar-doencas-severas-e-levar-a-morte>. Acesso em: 11 nov. 2024.

MCBRIDE, M. B. Toxic metals in sewage sludge-amended soils: a review. *Journal of Environmental Quality*, v. 24, n. 1, p. 5-18, 1995.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, v. 7, n. 9, p. 405-410, 2002.

MITTLER, R. Estresse oxidativo, antioxidantes e tolerância ao estresse. *Ciência Vegetal*,

Watsonville, 2002. Acesso em: 12 nov. 2024.

MONDAINI, M. M. et al. Influência da qualidade do solo na resposta fisiológica de culturas agrícolas submetidas ao estresse abiótico. *Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, v. 31, n. 2, p. 110–119, 2021.

MONDAINI, T. L. F. et al. Estratégias fisiológicas e bioquímicas em milho sob estresse por metais pesados. *Scientia Agraria Paranaensis*, v. 20, n. 1, p. 48–56, 2021.

MORAES, C. Alterações fisiológicas e ultraestruturais de plântulas de tomate induzidas por chumbo. *Iheringia, Série Botânica*. Acesso em: 10 dez. 2024.

MEMON, A. R.; SCHRÖDER, P. Implications of metal accumulation mechanisms to phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 16, p. 162–175, 2009.

MØLLER, I. M.; JENSEN, P. E.; HANSSON, A. Oxidative modifications to cellular components in plants. *Annual Review of Plant Biology*, v. 58, p. 459–481, 2007.

MOREIRA, F. R.; MOREIRA, J. C. Os efeitos do chumbo sobre o organismo humano e seu significado para a saúde. *Revista Panamericana de Salud Pública*, v. 15, n. 2, p. 119–129, fev. 2004.

NATHALIA, C. Exposição ambiental ao chumbo: um problema de áreas contaminadas próximas a fábricas de baterias. 2025. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/8a5cecbc-549d-4f0d-9575-2aa69bed7fb8>. Acesso em: 3 fev. 2025.

NONATO, Edilene Fernandes. Capacidade antioxidante in vitro e efeito hepatoprotetor de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) em resposta ao estresse oxidativo induzido por tetracloreto de carbono. 2017.

NAWAZ, F. et al. Role of ascorbate peroxidase in abiotic stress tolerance in plants. In: *Plant Stress Physiology*. Elsevier, 2020. p. 159–173.

NAWAZ, F. et al. Role of ascorbate peroxidase in mitigating oxidative stress in plants under metal toxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 156, p. 684–692, 2020.

NORRIS, D. O.; DATE, R. A. Legume bacteriology. In: SHAM, N. H.; BRYAN, W. W. (Ed.).

Tropical pasture research: principles and methods. Hurley: Commonwealth Bureau of Pastures and Field Crops, 1976. p. 134–174. (Commonwealth Bureau of Pastures and Field Crops. Bulletin, 51).

OLIVEIRA, Ana Paula de et al. Avaliação da influência dos macronutrientes na bioacumulação do chumbo pela *Eichhornia crassipes*. 2012.

PANDOLFO, Miguel Licks. Acompanhamento de lavoura de soja e milho em terras baixas. 2017. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

PEREIRA, M. P. et al. Fitotoxicidade do chumbo na germinação e crescimento inicial de alface em função da anatomia radicular e ciclo celular. *Revista Agro@ambiente On-line*, 2013. Acesso em: 11 nov. 2024

PEREIRA, ISRAEL ALEXANDRE. O CULTIVO DO MILHO-VERDE. Embrapa Milho e Sorgo-Livro técnico (INFOTECA-E), 2002. Disponível em: <<https://bit.ly/3ajXoIk>> Acesso em 19 de abril de 2021.

PEREIRA, MÁRCIO PAULO et al. Fitotoxicidade do chumbo na germinação e crescimento inicial de alface em função da anatomia radicular e ciclo celular. *Revista Agro@ Ambiente On-line*, v. 7, n. 1, p. 36-43, 2013.

PEREIRA DA SILVA, N. Desempenho agrônomo e fisiológico de híbridos de milho cultivados com e sem restrição hídrica. Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal no Semiárido. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/204421/1/Paulo-Cesar-dissertacao-Natanael.pdf>.

POURRUT, B. et al. Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 213, p. 113-136, 2011.

RIBEIRO, E. S. et al. Relações da anatomia radicular na absorção, no acúmulo e na tolerância ao chumbo em *Echinodorus grandiflorus*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, p. 605-612, 2015. Acesso em: 10 dez. 2025.

RAHMAN, M. A. et al. Lead-induced oxidative stress and biomarker responses in aquatic plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 90, p. 120–128, 2013.

RIBEIRO, Marcos André do Côto et al. Contaminação do solo por metais pesados. 2013. Dissertação (Mestrado).

Resolução nº 420 de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.

SARAIVA, Kátia Daniella da Cruz. Respostas moleculares e fisiológicas envolvidas com tolerância a estresses isolados e combinados de salinidade e temperatura elevada em dois genótipos de *Sorghum bicolor* (L.) Moench. 2017.

SHAH, K. et al. Effects of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. *Plant Science*, v. 161, p. 1135–1144, 2001.

SHARMA, P. Toxicidade de chumbo em plantas. *Brasília, Campinas*, v. 17, p. 35–52, 2005. Acesso em: 12 nov. 2024.

SEREGIN, I. V.; KOZHEVNIKOVA, A. D. Root morphology, heavy metal uptake, and translocation in plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, v. 51, n. 4, p. 529–544, 2004.

SOARES, C. R. F. S.; LAVRES JUNIOR, J.; MONTEIRO, F. A. Toxicidade de metais pesados em plantas. *Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 26, p. 293–303, 2001.

SHIGEOKA, S. et al. Regulation and function of ascorbate peroxidase isoenzymes. *Journal of Experimental Botany*, v. 53, n. 372, p. 1305–1319, 2002.

SBRUSSI, Cesar Augusto Gasparetto; ZUCARELI, Claudemir. Germinação de sementes de milho com diferentes níveis de vigor em resposta a diferentes temperaturas. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 35, n. 1, p. 215-226, 2014.

SHAHNAWAZ, M. D. Aluminium induced oxidative stress and antioxidants system in two barley varieties and its alleviation through ascorbic acid and salicylic acid seed priming approach. Disponível em: [link]. Acesso em: 01 out. 2024.

SHARMA, P.; DUBEY, R. S. Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v.

17, n. 1, p. 35-52, 2005.

SINGH, S. et al. Toxicity of lead: A review with recent updates. *Interdisciplinary Toxicology*, v. 9, n. 2, p. 47–58, 2016.

SILVA, D. S. G. Estresse oxidativo e o mecanismo de defesa de plantas contra patógenos. Porto Velho, RO, 2013. Acesso em: 17 nov. 2024.

SILVA, M. L. S. Avaliação do comportamento de elementos traços essenciais e não essenciais em solo contaminado sob cultivo de plantas. 2014. Acesso em: 10 nov. 2024.

SILVA, M. L. S.; VITTI, G. C.; TREVIZAM, A. R. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Acesso em: 12 dez. 2024.

SILVA FILHO, Reginaldo Correia et al. Avaliação da produção de espécies reativas em células linfomononucleares e do status redox celular em eritrócitos da população circunvizinha a Laguna Mundaú (Maceió-AL) exposta a espécies químicas potencialmente tóxicas. 2021.

SILVA, Thiago de Oliveira et al. Elaboração e avaliação da atividade antioxidante de farinha do coco catolé (*Syagrus cearensis*). 2024.

SILVA D,S,G Estresse oxidativo e o mecanismo de defesa de plantas contra patógenos. Porto velho RO 2013.Acesso em: 17/11/2024.

SILVA, M. L. S. Avaliação do comportamento de elementos traços essenciais e não essenciais em solo contaminado sob cultivo de plantas, 2014 Acesso em 10/11/2024.

SILVA, M. L. S.; VITTI, G. C.; TREVIZAM, A. R. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Acesso em 12/12/2024

SHAHNAWAZ, M. D.. Aluminium induced oxidative stress and antioxidants system in two barley varieties and its alleviation through ascorbic acid and salicylic acid seed priming

approach.. Disponível em: . Acesso em: 01/10/2024.

SOUSA, Marília Caixeta. Reguladores vegetais e nutrientes minerais no metabolismo de plantas de tomateiro. 2016.

TAIZ, Lincoln et al. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. Porto Alegre: Artmed, 2017.

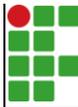
TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

YADAV, S. K. Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African Journal of Botany*, v. 76, n. 2, p. 167–179, 2010.

ZHOU, Q. et al. Response of antioxidant systems and gene expression to Pb stress in maize. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, p. 1975–1983, 2019.

ZHOU, Y. et al. Ascorbate peroxidase: A key player in abiotic stress tolerance in plants. *Biologia Plantarum*, v. 63, p. 601–608, 2019.

ZANCHETTA, Grazielle Simone Boscatto et al. Avaliação do grau de poluição do solo, águas, plantas e resíduos sólidos do lixão Linha Rincão do Engenho de Lagoa Vermelha, RS. 2007.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus Princesa Isabel - Código INEP: 25282930
	Br 426, S/N, Zona Rural / Sítio Barro Vermelho, CEP 58755-000, Princesa Isabel (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0007-60 - Telefone: (83) 3065.4901

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC final

Assunto:	TCC final
Assinado por:	Emelly Keronn
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Emelly Keronn Ferreira Soares da Silva, ALUNO (202024020013) DE LICENCIATURA EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS - CAMPUS PRINCESA ISABEL, em 13/09/2025 20:53:17.

Este documento foi armazenado no SUAP em 15/09/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1609615

Código de Autenticação: 2c60a9c7f4

