

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta
tese será disponibilizado somente
a partir de 23/02/2027

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**EFEITO DOS ESTRESSES ABIÓTICOS NOS ÍNDICES
FISIOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS DE MICRO-TOM: UMA
ABORDAGEM COM MACHINE LEARNING**

Laura Matos Ribera
Engenheira Agrônoma

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**EFEITO DOS ESTRESSES ABIÓTICOS NOS ÍNDICES
FISIOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS DE MICRO-TOM: UMA
ABORDAGEM COM MACHINE LEARNING**

Discente: Laura Matos Ribera
Orientadora: Profa. Dra. Priscila Lupino Gratão

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Agronomia (Produção Vegetal).

M433e Matos Ribera, Laura
Efeito dos estresses abióticos nos índices fisiológicos e bioquímicos de Micro-Tom: Uma abordagem com Machine learning/ Laura Matos Ribera. -- Jaboticabal, 2026
73 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientadora: Priscila Lupino Gratão

1. Fisiologia vegetal. 2. Estresse vegetal. 3. Estresse abiótico. I. Título.

Impacto potencial da pesquisa

O presente trabalho teve como objetivo investigar os efeitos dos estresses abióticos sobre os índices fisiológicos e bioquímicos em plantas de tomate Micro-Tom, associados ao uso de técnicas de *machine learning*, fornecendo bases científicas relevantes para o entendimento de suas respostas a condições adversas.

No que se refere ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), o estudo contribui para a compreensão das respostas dos sistemas antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos das plantas frente a estresses abióticos, como deficiência hídrica, salinidade e contaminação por metais pesados. Esses conhecimentos auxiliam na tomada de decisão quanto ao manejo agrícola sustentável.

Em relação a ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), a pesquisa evidencia como as plantas de Micro-Tom respondem a cenários de mudanças ambientais extremas, destacando o potencial da utilização de modelos para prever impactos e orientar estratégias de mitigação frente aos efeitos das mudanças climáticas.

Por fim, o trabalho também se alinha a ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ao promover a integração entre a agricultura e ferramentas tecnológicas, como o *machine learning*, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas inteligentes de monitoramento e apoio à tomada de decisão em tempo real.

Potential Impact of the Research

The present study aimed to evaluate the effects of abiotic stresses on physiological and biochemical indices in Micro-Tom tomato plants, integrating machine learning approaches to provide robust scientific support for understanding plant responses under adverse environmental conditions.

With regard to Sustainable Development Goal (SDG) 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture), this study advances the understanding of enzymatic and non-enzymatic antioxidant defense mechanisms in plants subjected to abiotic stresses, including water deficit, salinity, and heavy metal contamination. These insights contribute to more informed decision-making in sustainable agricultural management practices.

In relation to SDG 13 (Climate Action), the findings elucidate the responses of Micro-Tom plants under extreme environmental scenarios, highlighting the applicability of predictive modeling to anticipate stress-induced impacts and to support the development of mitigation strategies addressing climate change.

Furthermore, the study aligns with SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) by fostering the integration of agricultural systems with advanced technological tools, such as machine learning, thereby contributing to the development of intelligent monitoring frameworks and real-time decision-support systems.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: EFEITO DOS ESTRESSES ABIÓTICOS NOS ÍNDICES FISIOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS DE MICRO-TOM: UMA ABORDAGEM COM MACHINE LEARNING

AUTORA: LAURA MATOS RIBERA

ORIENTADORA: PRISCILA LUPINO GRATÃO

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

Documento assinado digitalmente
 **PRISCILA LUPINO GRATÃO**
Data: 25/02/2026 19:45:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. PRISCILA LUPINO GRATÃO (Participação Presencial)
Departamento de Biologia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **GILMAR DA SILVEIRA SOUSA JÚNIOR**
Data: 26/02/2026 09:43:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. GILMAR DA SILVEIRA DE SOUSA JÚNIOR (Participação Presencial)
Ensino Superior de Bebedouro Victório Cardassi (Imesb) / Bebedouro/SP

Documento assinado digitalmente
 **GEORGIA BERTONI POMPEU**
Data: 25/02/2026 22:50:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. GEORGIA BERTONI POMPEU (Participação Virtual)
ESALQ USP / Piracicaba/SP

Documento assinado digitalmente
 **MIRELA VANTINI CHECCHIO**
Data: 26/02/2026 14:29:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pós-Doutoranda MIRELA VANTINI CHECCHIO (Participação Presencial)
Departamento de Fitossanidade / FCAV/UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **PEDRO LUIS DA COSTA AGUIAR ALVES**
Data: 26/02/2026 14:48:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. PEDRO LUÍS DA COSTA AGUIAR ALVES (Participação Presencial)
Departamento de Biologia / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 23 de fevereiro de 2026.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Laura Matos Ribera – Nasceu em 23 de março de 1997 no município de Guarulhos, São Paulo. Em 2015 mudou-se para o estado de Mato Grosso do Sul para fazer Agronomia na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Unidade Universitária de Aquidauana. Durante este período, desenvolveu duas iniciações científicas e participou do Programa de Educação Tutorial (PET/Agro). Em 2020 retornou ao estado de São Paulo, para realizar o mestrado em Agronomia no Departamento de Horticultura pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), campus de Botucatu, durante este período trabalhou com os compostos nutricionais e antinutricionais da cultura da soja-hortaliça cujo os trabalhos renderam duas publicações científicas a autora. No ano de 2022, mudou-se para Jabotical para realizar o doutoramento na área de Agronomia (Produção Vegetal) trabalhando com estresses abióticos em tomate micro-tom.

EPÍGRAFE

Abrir as portas,
tirar os ferrolhos,
abandonar as muralhas que te protegem
viver a vida e aceitar o desafio,
recuperar o riso,
ensaiar um canto,
baixar a guarda e estender as mãos,
abrir as asas
e tentar de novo
celebrar a vida e relançar-se no infinito.

Mario Benedetti

A minha madrinha Andrea Ribera e aos meu pais Diva e Alexandre por me permitir
vivenciar esse sonho.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A uma força maior que nos guia e sustenta, por me permitir viver um momento tão único e gratificante. À minha família, em especial meus pais, Alexandre e Diva; minha irmã, Larizza; minha madrinha, Andrea; minha tia Silvia e meus avós Aparecida e José (*in memoriam*), minha fonte inesgotável de amor e a quem destino tudo o que faço. Aos seres de luz que caminham ao nosso lado com seus pelinhos e patinhas, trazendo conforto, paz e serenidade nos momentos de aflição: obrigada, Luna, Fred e Loren, por compartilharem comigo esta jornada na vida terrestre.

Aos verdadeiros amigos, aqueles com quem não precisamos falar todos os dias, mas torcem muito por mim, Ro, Bia, meus amigos da graduação e da noite da pizza obrigada pela amizade e compenheirismo de anos.

À Professora Priscila, pelo olhar e escuta atentos e, acima de tudo, pelo acolhimento. Obrigada por me aceitar, valorizando minhas qualidades e reconhecendo com sutileza minhas dificuldades.

Ao meu amigo Gilmar, por sempre falar meu nome em uma sala cheia de oportunidades. Minha gratidão e admiração.

Aquelas pessoas cuja presença tornou possível a realização deste trabalho, Efraim, Eduarda e Carolzinha, agradeço a ajuda na condução do experimento, nas análises laboratoriais, e é claro, pelos momentos de descontração e amizade construída.

Aos amigos Letícia, Carlos, Lara, Mara, Thati, João Carlos, LuLu e Vinícius (Malvadeza), por tornarem a pós-graduação mais leve e acolhedora. E, por fim, à Mariana, pela amizade, carinho e apoio constante ao longo desta jornada, sempre presente nos momentos mais difíceis e também nos mais felizes.

Aos amigos do LASPP e à técnica de laboratório Sonia Maria Raimundo Carregari, pelo carinho, preocupação e conhecimento compartilhado. A todos os funcionários do Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária, pela manutenção das dependências e pela agilidade nos procedimentos necessários.

Ao Restaurante Universitário e a toda sua equipe, pelo fornecimento de

refeições e pelos momentos de descontração entre amigos. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro, bolsa 001, que possibilitou o cumprimento desta etapa. À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, por me receber durante esses quatro anos de doutoramento.

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

Sumário

CAP 1 INTRODUÇÃO GERAL	12
CAP 2 Approaches for Abiotic Stress-Mediated Modulation in Micro-Tom Plants: A Systematic Review	14
List of Abbreviations	15
1 Introduction	17
2 Materials and Methods	18
2.1 Search Strategy	18
2.2 Data Extraction	18
3 Results	18
3.1 Effects of Abiotic Stress on Plant Biometric Characteristics	21
3.2 Influence of Stress Agents on the Composition of Micro-Tom Plants	21
3.3 Impact of Abiotic Stress on Photosynthetic Pigments.....	22
3.4 Antioxidant System Responses to Stress.....	22
3.5 Activation of the Antioxidant System in Response to Abiotic Stress	24
Observations on the Points Discussed.....	29
Final considerations	30
References	31
CAP 3 Machine learning model provides stress biomarkers for the classification of abiotic stress in Micro-Tom	37
1. INTRODUCTION.....	38
2. RESULTS.....	41
2.1 Descriptive analysis	41
2.2 Correlation and regression analysis	42
2.3 Multiple linear regression for MDA and H ₂ O ₂	42
2.4 Proline and SOD effects on stress indicators	43
2.5 Decision tree model	43
3. DISCUSSION	44
4. MATERIAL AND METHODS	48
4.1 Plant material.....	48
4.2 Experimental design and treatments.....	48
4.3 Sampling dates	49
4.4 Lipid peroxidation.....	49
4.5 Hydrogen peroxide content.....	49
4.6 Proline content.....	49
4.7 Enzyme extraction and protein determination	50
4.8 Enzyme assays.....	50
Superoxide dismutase (SOD, E.C.1.15.1.1).....	50

Catalase (CAT, E.C. 1.11.1.6)	50
Glutathione peroxidase (GSH-Px, E.C. 1.11.1.9)	51
Ascorbate peroxidase (APX, E.C.1.11.1.11)	51
Glutathione reductase (GR, E.C. 1.6.4.2).....	51
4.9 Statistical analysis	51
4.9.1 Descriptive analysis and multiple linear regression	51
4.9.2 Stress class creation	52
4.9.3 Machine learning model	53
4.9.4 Machine learning model performance	53
5. Conclusion	55
References.....	55
CAP 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71

CAP 1 INTRODUÇÃO GERAL

Esta tese constitui uma contribuição científica para a compreensão da resposta do sistema antioxidante de plantas micro-tom sob condições de estresses abióticos. Considerando o atual cenário de mudanças climáticas, antes previsto e agora vivenciado, e a necessidade de compreender como as plantas reagem diante desses desafios, esta pesquisa busca oferecer *insights* importantes para o enfrentamento dessas adversidades. Os capítulos apresentados a seguir têm como objetivo facilitar a compreensão das contribuições científicas deste trabalho e são resumidos brevemente abaixo.

No **Capítulo 2**, foi realizada uma revisão sistemática da literatura com o propósito de reunir e analisar estudos que abordam o uso de micro-tom em pesquisas sobre estresses abióticos. Essa análise abrangente contemplou o período de 1992 a 2024. Os artigos identificados nesse intervalo apresentam contribuições relevantes ao demonstrar como diferentes tipos de estresse modulam a atividade antioxidante das plantas, atuando na manutenção do equilíbrio redox. Os estudos selecionados foram rigorosamente avaliados segundo o protocolo PRISMA, com foco nos componentes metodológicos das pesquisas incluídas. As percepções resultantes dessa revisão fortalecem o debate acerca da utilização do Micro-Tom como planta modelo para o estudo das respostas antioxidantes.

No **Capítulo 3**, propomos uma abordagem diferente para quantificação de estresses abióticos em plantas de Micro-Tom. Para isso, utilizamos a árvore de decisão como modelo de classificação de estresses com base nos níveis de MDA e peróxido de hidrogênio. A partir dos resultados das análises laboratoriais das respostas antioxidantes e a classificação quanto às classes enquadradas. A classificação dos níveis do estresse é a ferramenta inicial para estudos que busquem quantificar os limites de estresse suportados pelas plantas.

Por fim, o **Capítulo 4**, sintetiza os principais achados apresentados ao longo da tese, articulando criticamente os resultados da revisão sistemática e da abordagem experimental com aprendizado de máquina. Esse capítulo discute as contribuições científicas do trabalho, suas implicações para o entendimento das respostas antioxidantes do Micro-Tom frente a estresses abióticos e as limitações metodológicas identificadas. Além disso, são apontadas perspectivas para pesquisas

futuras, destacando o potencial da integração entre fisiologia vegetal e inteligência artificial como ferramenta promissora para o avanço de estudos sobre tolerância ao estresse e para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes de monitoramento e manejo em cenários de mudanças climáticas.

CAP 2 Approaches for Abiotic Stress-Mediated Modulation in Micro-Tom Plants: A Systematic Review

Abstract

Abiotic stresses, directly impact plant physiology and growth. These effects are modulated by the efficiency of antioxidant systems that regulate the balance between reactive oxygen species production and scavenging. This systematic review synthesizes current evidence on how these stresses influence the modulation of antioxidant defenses in Micro-Tom, a widely adopted model genotype in plant science. The review followed the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses protocol and utilized the Web of Science and Scopus databases to identify relevant articles published from 1992 to 2024. Of the 108 initially identified studies, 25 met the inclusion criteria and were comprehensively analyzed regarding their physiological and biochemical findings. This review provides critical insights into the mechanisms underlying Micro-Tom's responses to abiotic stresses, offering a foundation for strategies aimed at enhancing plant resilience under adverse environmental conditions and optimizing production in sustainable agricultural systems.

Keywords: *Solanum lycopersicum* L.; antioxidant metabolism; oxidative stress and stress tolerance.

List of Abbreviations

APX: Ascorbate Peroxidase

AsA: Ascorbic Acid

CAT: Catalase

Cd²⁺: Cadmium ion

CdCl₂: Cadmium Chloride

Cu: Copper

Dgt: Diageotropica Mutant of Micro-Tom Tomato

ROS: Reactive Oxygen Species

Fe²⁺: Iron ion

GPOX: Guaiacol Peroxidase

GR24: Synthetic Strigolactone (Strigolactone Analog)

GSH: Reduced Glutathione

GSH-Px: Glutathione Peroxidase

GSNO: S-Nitrosoglutathione

GSSG: Oxidized Glutathione

H₂O₂: Hydrogen Peroxide

H₂S: Hydrogen Sulfide

K: Potassium

MAPK: Mitogen-Activated Protein Kinases

MDA: Malondialdehyde

MDHA: Monodehydroascorbate

Mg: Magnesium

N: Nitrogen

Na⁺: Sodium ion

NaCl: Sodium Chloride

Ni: Nickel

NO: Nitric Oxide

Nr: Never Ripe Mutant of Micro-Tom Tomato

O₂: Oxygen

O₂•⁻: Superoxide Anion

P: Phosphorus

pH: Hydrogen Ion Concentration (Potential of Hydrogen)

POD: Peroxidases

Pro: Proline

S: Sulfur

SB203580: Specific MAPK Inhibitor

Si: Silicon

SOD: Superoxide Dismutase

Ti5108: Strigolactone Biosynthesis Inhibitor

Zn: Zinc

1 Introduction

Plants are dynamic organisms continuously exposed to environmental adversities that compromise their growth, development, and yield (1). Abiotic stress factors—such as fluctuations in light availability, nutrient deficiencies, toxic metal accumulation, high salinity, and water scarcity, pose significant challenges to plant homeostasis (2). These stressors often lead to excessive reactive oxygen species (ROS) accumulation, causing damage to lipids, proteins, and nucleic acids, ultimately resulting in metabolic dysfunction and, in severe cases, cell death (3).

To alleviate these deleterious effects, plants have evolved sophisticated physiological and biochemical defense mechanisms, with the antioxidant system playing a pivotal role in neutralizing ROS and maintaining cellular homeostasis (4). This system comprises enzymatic antioxidants, such as superoxide dismutase (SOD, EC 1.15.1.1), catalase (CAT, EC 1.11.1.6), and peroxidases (POD, EC 1.11.1.7) (5), as well as non-enzymatic antioxidants like ascorbate (AsA) and glutathione (GSH), which synergistically confer protection against oxidative stress (6). Effective regulation of these antioxidant responses is essential for plant acclimation to adverse conditions and for maintaining cellular integrity.

Among the model species employed in stress physiology studies, tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is notable due to its agronomic importance and extensive characterization in plant Science (7). Within this species, the Micro-Tom cultivar has emerged as an ideal experimental model owing to its diminutive size, short life cycle, fleshy fruits, and amenability to controlled environmental conditions, thus facilitating detailed investigations of oxidative metabolism (8) and offering distinct advantages over models such as *Arabidopsis*.

In this context, the present study systematically reviews the influence of abiotic stresses on the modulation of the antioxidant system in Micro-Tom plants. By applying the PRISMA protocol, this review ensures methodological rigor in the

selection and analysis of studies, contributing to a deeper understanding of plant tolerance mechanisms and supporting the development of strategies to improve crop resilience in the face of climate change and increasing environmental stressors.

5. Conclusion

The decision tree model demonstrated robust performance in accurately classifying the extreme classes (Low and High); however, it encountered limitations in distinguishing between classes with closely proximate values (Low-Average and High-Average). Increasing the sample size in future studies may further improve model stability and enhance the discrimination of these transitional stress levels.

To strengthen the classification performance, integrating additional data, such as root biochemical responses or measurements taken during flowering and fruiting stages, may provide more comprehensive physiological signatures, as supported by findings from comparative studies. Moreover, the use of ensemble learning techniques, such as Random Forest or Gradient Boosting, could mitigate classification errors by better capturing nonlinear patterns, particularly in cases where class boundaries exhibit substantial overlap.

Expanding the applicability of this model to incorporate additional biomarkers or other types of abiotic stress could open new research avenues and further strengthen its predictive capacity. Such advancements would also enhance their practical relevance, enabling the development of precision agriculture tools capable of monitoring stress severity more accurately and guiding timely interventions to mitigate plant stress under field conditions.

References

1. Contreras-Cornejo, H. A. *et al.* Abiotic plant stress mitigation by *Trichoderma* species. *Soil Ecol. Lett.* **6**, 240240 (2024).
2. Chiconato, D. A., da Silveira Sousa Junior, G., dos Santos, D. M. M. & Munns, R. Adaptation of sugarcane plants to saline soil. *Environmental and Experimental Botany* **162**, 201–211 (2019).
3. Alves, L. R. *et al.* Mechanisms of cadmium-stress avoidance by selenium in tomato plants. *Ecotoxicology* **29**, 594–606 (2020).
4. Seleiman, M. F. *et al.* Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants* **10**, 259 (2021).

5. Akbari, M., Sabouri, H., Sajadi, S. J., Yarahmadi, S. & Ahangar, L. Classification and prediction of drought and salinity stress tolerance in barley using GenPhenML. *Sci Rep* **14**, 17420 (2024).
6. Yang, X. *et al.* Response Mechanism of Plants to Drought Stress. *Horticulturae* **7**, 50 (2021).
7. Montesinos, C. *et al.* Avaliação e caracterização em campo de um novo bioestimulante para o cultivo de brócolis (*Brassica oleracea* var . *italica*) sob estresse hídrico e salino que aumenta o conteúdo de antioxidantes, glucosinolatos e fitohormônios. *Scientia Horticulturae* **338**, 113584 (2024).
8. Gisbert, C., Timoneda, A., Porcel, R., Ros, R. & Mulet, J. M. Overexpression of BvHb2, a Class 2 Non-Symbiotic Hemoglobin from Sugar Beet, Confers Drought-Induced Withering Resistance and Alters Iron Content in Tomato. *Agronomy* **10**, 1754 (2020).
9. Patel, M., Fatnani, D. & Parida, A. K. Mitigação do estresse hídrico induzida por silício em genótipos de amendoim (*Arachis hypogaea* L.) por meio da homeostase iônica, modulações do sistema de defesa antioxidante e regulações metabólicas. *Plant Physiology and Biochemistry* **166**, 290–313 (2021).
10. Behtash, F., Amini, T., Mousavi, S. B., Seyed Hajizadeh, H. & Kaya, O. Efficiency of zinc in alleviating cadmium toxicity in hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Ferdos). *BMC Plant Biology* **24**, 648 (2024).
11. Rezaie, N., Razzaghi, F. & Sepaskhah, A. R. Different Levels of Irrigation Water Salinity and Biochar Influence on Faba Bean Yield, Water Productivity, and Ions Uptake. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **50**, 611–626 (2019).
12. Saddiq, M. S. *et al.* Effect of Salinity Stress on Physiological Changes in Winter and Spring Wheat. *Agronomy* **11**, 1193 (2021).
13. Spormann, S., Soares, C., Azenha, M., Martins, V. & Fidalgo, F. A look into osmotic, ionic, and redox adjustments in wild tomato species under combined salt and water stress. *Plant Stress* **13**, 100510 (2024).
14. Riaz, M. *et al.* O fornecimento de boro alivia a toxicidade do cádmio no arroz (*Oryza sativa* L.) aumentando a adsorção de cádmio na parede celular e ativando o sistema de defesa antioxidante nas raízes. *Chemosphere* **266**, 128938 (2021).
15. Anwar, T., Qureshi, H., Jabeen, M., Zaman, W. & Ali, H. M. Mitigation of cadmium-induced stress in maize via synergistic application of biochar and gibberellic acid to enhance morpho-physiological and biochemical traits. *BMC Plant Biology* **24**, 192 (2024).

16. Zhang, Q. *et al.* Defense guard: strategies of plants in the fight against Cadmium stress. *Adv. Biotechnol.* **2**, 44 (2024).
17. Zulfiqar, U. *et al.* Cadmium Phytotoxicity, Tolerance, and Advanced Remediation Approaches in Agricultural Soils; A Comprehensive Review. *Front. Plant Sci.* **13**, (2022).
18. Zhang, Y. *et al.* SIPHL1, a MYB-CC transcription factor identified from tomato, positively regulates the phosphate starvation response. *Physiologia Plantarum* **173**, 1063–1077 (2021).
19. Çelik, Ö., Ayan, A. & Atak, Ç. Enzymatic and non-enzymatic comparison of two different industrial tomato (*Solanum lycopersicum*) varieties against drought stress. *Botanical Studies* **58**, 32 (2017).
20. Caverzan, A. *et al.* Plant responses to stresses: role of ascorbate peroxidase in the antioxidant protection. *Genet. Mol. Biol.* **35**, 1011–1019 (2012).
21. Soares, C., Carvalho, M. E. A., Azevedo, R. A. & Fidalgo, F. Plants facing oxidative challenges—A little help from the antioxidant networks. *Environmental and Experimental Botany* **161**, 4–25 (2019).
22. Gratão, P. L. *et al.* Cadmium stress antioxidant responses and root-to-shoot communication in grafted tomato plants. *Biometals* **28**, 803–816 (2015).
23. Todaka, D. *et al.* Application of ethanol alleviates heat damage to leaf growth and yield in tomato. *Front. Plant Sci.* **15**, (2024).
24. Sun, H.-J., Uchii, S., Watanabe, S. & Ezura, H. A Highly Efficient Transformation Protocol for Micro-Tom, a Model Cultivar for Tomato Functional Genomics. *Plant and Cell Physiology* **47**, 426–431 (2006).
25. Yan, M. *et al.* The involvement of abscisic acid in hydrogen gas-enhanced drought resistance in tomato seedlings. *Scientia Horticulturae* **292**, 110631 (2022).
26. Yang, R. *et al.* Strigolactones are involved in hydrogen sulfide-enhanced salt tolerance in tomato seedlings. *Plant Stress* **11**, 100316 (2024).
27. Machado, J. *et al.* Enzymatic and Non-Enzymatic Antioxidant Responses of Young Tomato Plants (cv. Micro-Tom) to Single and Combined Mild Nitrogen and Water Deficit: Not the Sum of the Parts. *Antioxidants* **12**, 375 (2023).
28. Chu, Z. *et al.* Linking phytohormones with growth, transport activity and metabolic responses to cadmium in tomato. *Plant Growth Regul* **90**, 557–569 (2020).
29. Sandhu, K., Patil, S. S., Pumphrey, M. & Carter, A. Multitrait machine- and deep-learning models for genomic selection using spectral information in a wheat breeding program. *The Plant Genome* **14**, e20119 (2021).

30. Madhumita, P. S., Ragavi, C., Kiranmayi, C., M, V. & Prabhavathy, P. Drought and Salinity Stress Classification in Soyabean Crops: Comparative Analysis of Machine Learning Models. in *2024 International Conference on Signal Processing, Computation, Electronics, Power and Telecommunication (IConSCEPT)* 1–5 (2024). doi:10.1109/IConSCEPT61884.2024.10627854.
31. Oshternian, S. R., Loipfinger, S., Bhattacharya, A. & Fehrmann, R. S. N. Exploring combinations of dimensionality reduction, transfer learning, and regularization methods for predicting binary phenotypes with transcriptomic data. *BMC Bioinformatics* **25**, 167 (2024).
32. Sarker, I. H. Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions. *SN COMPUT. SCI.* **2**, 160 (2021).
33. Houetohossou, S. C. A., Houndji, V. R., Hounmenou, C. G., Sikirou, R. & Kakaï, R. L. G. Deep learning methods for biotic and abiotic stresses detection and classification in fruits and vegetables: State of the art and perspectives. *Artificial Intelligence in Agriculture* **9**, 46–60 (2023).
34. Xu, L., Liu, H., Mittler, R. & Shabala, S. Useful or merely convenient: can enzymatic antioxidant activity be used as a proxy for abiotic stress tolerance? *J Exp Bot* **76**, 1524–1533 (2025).
35. Patel, J. *et al.* UV-C-induced reactive carbonyl species are better detoxified in the halophytic plants *Salicornia brachiata* and *Arthrocnemum macrostachyum* than in the halophytic *Sarcocornia fruticosa* plants. *The Plant Journal* **122**, e70239 (2025).
36. Sana, S. *et al.* Differential responses of chili varieties grown under cadmium stress. *BMC Plant Biology* **24**, 7 (2024).
37. Sultana, M. S., Sakurai, C., Biswas, M. S., Szabados, L. & Mano, J. Accumulation of reactive carbonyl species in roots as the primary cause of salt stress-induced growth retardation of *Arabidopsis thaliana*. <https://doi.org/10.1111/ppl.14198> doi:10.1111/ppl.14198.
38. Rabêlo, F. H. S. *et al.* Adequate S supply reduces the damage of high Cd exposure in roots and increases N, S and Mn uptake by Massai grass grown in hydroponics. *Environmental and Experimental Botany* **148**, 35–46 (2018).
39. Chen, L. *et al.* Gene identification and transcriptome analysis of cadmium stress in tomato. *Front. Sustain. Food Syst.* **7**, (2023).
40. Dar, M. I., Naikoo, M. I., Rehman, F., Naushin, F. & Khan, F. A. Proline Accumulation in Plants: Roles in Stress Tolerance and Plant Development. in *Osmolytes and Plants Acclimation to Changing Environment: Emerging Omics Technologies* (eds Iqbal, N., Nazar, R. & A. Khan, N.) 155–166 (Springer India, New Delhi, 2016). doi:10.1007/978-81-322-2616-1_9.

41. Hayat, S. *et al.* Role of proline under changing environments: Uma revisão. *Plant Signaling & Behavior* **7**, 1456–1466 (2012).
42. López-Gómez, M., Hidalgo-Castellanos, J., Iribarne, C. & Lluch, C. Proline accumulation has prevalence over polyamines in nodules of *Medicago sativa* in symbiosis with *Sinorhizobium meliloti* during the initial response to salinity. *Plant Soil* **374**, 149–159 (2014).
43. Hosseinfard, M. *et al.* Contribution of Exogenous Proline to Abiotic Stresses Tolerance in Plants: A Review. *International Journal of Molecular Sciences* **23**, 5186 (2022).
44. Guan, C. *et al.* Proline Biosynthesis Enzyme Genes Confer Salt Tolerance to Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) in Cooperation With Polyamines Metabolism. *Front. Plant Sci.* **11**, (2020).
45. Souri, Z., Khanna, K., Karimi, N. & Ahmad, P. Silicon and Plants: Current Knowledge and Future Prospects. *J Plant Growth Regul* **40**, 906–925 (2021).
46. Peña Calzada, K. *et al.* Regulatory Role of Silicon on Growth, Potassium Uptake, Ionic Homeostasis, Proline Accumulation, and Antioxidant Capacity of Soybean Plants Under Salt Stress. *J Plant Growth Regul* **42**, 4528–4540 (2023).
47. Chicco, D. & Jurman, G. The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. *BMC Genomics* **21**, 6 (2020).
48. Barros, M. M. de, Silva, F. M. da, Costa, A. G., Ferraz, G. A. e S. & Silva, F. C. da. Use of classifier to determine coffee harvest time by detachment force. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* **22**, 366–370 (2018).
49. Amoah, J. & Berko, D. Impact of Salinity Stress on Membrane Status, Phytohormones, Antioxidant Defense System and Transcript Expression Pattern of Two Contrasting Sorghum Genotypes. *Egyptian Journal of Agronomy* **42**, 123–136 (2020).
50. Gharsallah, C., Fakhfakh, H., Grubb, D. & Gorsane, F. Effect of salt stress on ion concentration, proline content, antioxidant enzyme activities and gene expression in tomato cultivars. *AoB PLANTS* **8**, plw055 (2016).
51. Jakovljević, D. Z., Topuzović, M. D., Stanković, M. S. & Bojović, B. M. Changes in antioxidant enzyme activity in response to salinity-induced oxidative stress during early growth of sweet basil. *Hortic. Environ. Biotechnol.* **58**, 240–246 (2017).
52. Mura, A. *et al.* Catalytic pathways of *Euphorbia characias* peroxidase reacting with hydrogen peroxide. **387**, 559–567 (2006).

53. Manai, J., Gouia, H. & Corpas, F. J. A homeostase redox e do óxido nítrico é afetada em raízes de tomateiro (*Solanum lycopersicum*) sob estresse oxidativo induzido pela salinidade. *Journal of Plant Physiology* **171**, 1028–1035 (2014).
54. Murshed, R., Lopez-Lauri, F. & Sallanon, H. Effect of water stress on antioxidant systems and oxidative parameters in fruits of tomato (*Solanum lycopersicon* L, cv. Micro-tom). *Physiol Mol Biol Plants* **19**, 363–378 (2013).
55. El-Beltagi, H. S., Mohamed, H. I. & Sofy, M. R. Role of Ascorbic acid, Glutathione and Proline Applied as Singly or in Sequence Combination in Improving Chickpea Plant through Physiological Change and Antioxidant Defense under Different Levels of Irrigation Intervals. *Molecules* **25**, 1702 (2020).
56. Gratão, P. I., Monteiro, C. c., Antunes, A. m., Peres, L. e. p. & Azevedo, R. a. Acquired tolerance of tomato (*Lycopersicon esculentum* cv. Micro-Tom) plants to cadmium-induced stress. *Annals of Applied Biology* **153**, 321–333 (2008).
57. Hoagland, D. R. & Arnon, D. J. *The Water-Culture Method for Growing Plants without Soil*. vol. 347 (Arnon, D. I. & California Agricultural Experiment Station, California Agricultural Experiment Station- Berkeley, 1950).
58. Pino-Nunes, L. Obtenção e uso de mutantes com alterações no balanço auxina/citocinina no estudo da competência organogênica em micro-tomateiro (*Lycopersicon esculentum* cv Micro-Tom). (Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005).
59. Heath, R. L. & Packer, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics* **125**, 189–198 (1968).
60. Gratão, P. L. *et al.* Dissecção bioquímica de mutantes de tomate *diageotropica* e *Never Mature* em condições estressantes de Cd. *Plant Physiology and Biochemistry* **56**, 79–96 (2012).
61. Alexieva, V., Sergiev, I., Mapelli, S. & Karanov, E. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant, Cell & Environment* **24**, 1337–1344 (2001).
62. Bates, L. S., Waldren, R. P. & Teare, I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil* **39**, 205–207 (1973).
63. Azevedo, R. A., Alas, R. M., Smith, R. J. & Lea, P. J. Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. *Physiologia Plantarum* **104**, 280–292 (1998).

64. Bradford, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry* **72**, 248–254 (1976).
65. Giannopolitis, C. N. & Ries, S. K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology* **59**, 309–314 (1977).
66. Kraus, T. E., McKersie, B. D. & Fletcher, R. A. Paclobutrazol-induced Tolerance of Wheat Leaves to Paraquat May Involve Increased Antioxidant Enzyme Activity. *Journal of Plant Physiology* **145**, 570–576 (1995).
67. Flohé, L. & Günzler, W. A. [12] Assays of glutathione peroxidase. in *Methods in Enzymology* vol. 105 114–120 (Academic Press, 1984).
68. Nagalakshmi, N. & Prasad, M. N. V. Respostas das enzimas do ciclo da glutathiona e do metabolismo da glutathiona ao estresse de cobre em *Scenedesmus bijugatus*. *Plant Science* **160**, 291–299 (2001).
69. Ozarda, Y. Reference intervals: current status, recent developments and future considerations. *Biochem Med* **26**, 5–11 (2016).
70. Krzywinski, M. & Altman, N. Classification and regression trees. *Nature Methods* **14**, 757–758 (2017).
71. Seliya, N., Khoshgoftaar, T. M. & Van Hulse, J. A Study on the Relationships of Classifier Performance Metrics. in *2009 21st IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence* 59–66 (2009). doi:10.1109/ICTAI.2009.25.