

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 28/01/2027.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Câmpus de Jaboticabal

THIFANY STELLA CATTOSSI DE MIRANDA

**TÉCNICA DE SEGMENTAÇÃO DE IMAGEM NO MONITORAMENTO DE
ESTRESSES ABIÓTICOS EM BANANEIRA**

Jaboticabal

2025

THIFANY STELLA CATTOSSI DE MIRANDA

**TÉCNICA DE SEGMENTAÇÃO DE IMAGEM NO MONITORAMENTO DE
ESTRESSES ABIÓTICOS EM BANANEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, para obtenção do título de Mestra em Agronomia (Produção Vegetal).

Orientador: Prof. Dr. Danilo Eduardo Rozane

Coorientador: Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim

Coorientadora: Dra. Thaís Rayane Gomes da Silva

Jaboticabal

2025

M672t	Miranda, Thifany Stella Cattossi de Técnica de segmentação de imagem no monitoramento de estresses abióticos em bananeira / Thifany Stella Cattossi de Miranda. -- Jaboticabal, 2025 60 p. : il., tabs., fotos Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Danilo Eduardo Rozane Coorientador: Glauco de Souza Rolim 1. Musa spp. 2. Silício. 3. Visão computacional. 4. Estresse abiótico. 5. Fenotipagem digital. I. Título.
-------	---



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: TÉCNICA DE SEGMENTAÇÃO DE IMAGEM NO MONITORAMENTO DE ESTRESSES ABIÓTICOS EM BANANEIRA

AUTORA: THIFANY STELLA CATTOSSI DE MIRANDA

ORIENTADOR: DANILO EDUARDO ROZANE

COORIENTADOR: GLAUCO DE SOUZA ROLIM

COORIENTADORA: THAÍS RAYANE GOMES DA SILVA

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

Documento assinado digitalmente
 **DANILO EDUARDO ROZANE**
Data: 30/07/2025 00:20:13-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. DANILO EDUARDO ROZANE (Participação Presencial)
Departamento de Agronomia e Recursos Naturais / FCAVR UNESP Registro

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO NARDINI GOMES**
Data: 29/07/2025 21:05:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. EDUARDO NARDINI GOMES (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Agrônômica / FCAVR UNESP Registro

Documento assinado digitalmente
 **GESIEL RIOS LOPES**
Data: 29/07/2025 22:15:56-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. GESIEL RIOS LOPES (Participação Presencial)
Laboratório de Sistemas Embarcados e Evolutivos / Instituto de Ciências Matemáticas e da Computação (ICMC)
- São Carlos/SP

Jaboticabal, 28 de julho de 2025

DEDICATÓRIA

Para João Davi e Tia Socorro,
que vivem em mim em cada conquista silenciosa.

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de toda sabedoria e misericórdia, entrego minha gratidão por ter me sustentado nos momentos de cansaço, silêncio e dúvida. Cada passo nesta caminhada foi permitido por Sua presença discreta, mas constante. A Ele, toda honra pela coragem e pelos dias em que a força veio quando eu não tinha mais nenhuma.

À querida Mãe, Rainha e Vencedora Três Vezes Admirável de Schoenstatt, minha profunda gratidão. Em momentos de fragilidade, encontrei no teu olhar materno o amparo que minha alma precisava. Sob tua intercessão, permaneci firme e confiante, mesmo quando o caminho parecia incerto. Obrigada, Mãe, por tua presença silenciosa, por me conduzir com amor e por me lembrar, em cada etapa, que nunca estive sozinha.

Aos meus pais, José Pio de Miranda Junior e Rosângela Maria Cattossi Mira, que nunca mediram esforços para que eu tivesse acesso ao conhecimento, ao estudo e à minha evolução pessoal. Obrigada por cada renúncia silenciosa, por cada palavra de apoio, e por atravessarem estados apenas para me ver chegar até aqui. Esta conquista é também de vocês, que sempre fizeram questão de caminhar ao meu lado, mesmo à distância.

Ao meu noivo, João Paulo Morais da Silva, que, seu cuidado discreto e sua parceria constante me deram chão, foco e direção. Ter vivido este ciclo ao lado dele — mesmo que longe fisicamente — me ensinou que amor também é presença silenciosa, é vínculo que resiste ao tempo e à ausência. Tornar-me sua noiva neste período foi mais do que um marco afetivo; foi a certeza de que, em meio às incertezas do mundo, eu escolhi alguém que constrói comigo.

Ao professor Danilo Eduardo Rozane, meu orientador, registro minha sincera gratidão pela confiança e pela forma acolhedora com que acompanhou esta pesquisa. Sua postura compreensiva e respeitosa diante dos desafios da caminhada foi fundamental para que eu me sentisse segura em momentos decisivos. Agradeço pelo incentivo e pela condução generosa, que contribuíram para que este trabalho se realizasse com liberdade, responsabilidade e crescimento.

Ao professor Glauco de Souza Rolim, meu coorientador, expresso minha sincera admiração e gratidão pela parceria constante ao longo desta jornada. Sua inteligência sensível, aliada à capacidade de orientar com clareza, paciência e

humanidade, fez com que cada etapa do trabalho se tornasse mais sólida e possível. Seus conselhos ponderados e sua generosidade em compartilhar conhecimento foram fundamentais para que este projeto se desenvolvesse com profundidade técnica e significado. A ele, agradeço por ter sido um verdadeiro alicerce nesta caminhada acadêmica.

À Thaís Rayane Gomes da Silva, não apenas coorientadora, mas luz em meio ao caos. Você foi apoio quando eu quis desistir, minha maior inspiração, minha força diária, minha amiga mais leal. Foi irmã, conselheira e porto seguro. Não existem palavras suficientes para agradecer o que você significou para mim — mas eu espero que essa dissertação também seja reflexo do tanto que você me fortaleceu.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) e ao Departamento de Ciências Exatas, minha gratidão pelo acolhimento, pela estrutura e pelas oportunidades oferecidas ao longo dessa jornada.

Ao Grupo GAS (Group of Agrometeorological Studies), por ter sido mais do que um espaço de pesquisa: foi casa, foi família. Aos colegas de grupo que dividiram suas experiências, tempo, risadas e apoio comigo, meu muito obrigada por tornarem o processo mais leve e humano.

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

Thifany Stella Cattossi de Miranda.

EPÍGRAFE

“Renda-se, como eu me rendi.
Mergulhe no que você não conhece, como eu mergulhei.
Não se preocupe em entender, viver ultrapassa qualquer entendimento.”
— *Clarice Lispector*

RESUMO

A bananeira (*Musa spp.*) é uma das frutíferas tropicais mais importantes em nível global, porém apresenta elevada sensibilidade ao frio, que desencadeia necroses foliares, reduz a área fotossintética ativa e compromete a produtividade. Esse estresse representa um desafio crescente em função da expansão do cultivo para regiões subtropicais e da intensificação de eventos climáticos extremos. Nesse contexto, o silício (Si) tem se destacado como elemento benéfico, associado à atenuação de diferentes estresses abióticos, embora seu papel específico na tolerância da bananeira ao frio ainda não esteja totalmente esclarecido. Esta dissertação teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes doses de Si na redução da necrose foliar induzida por frio em plantas jovens de 'Grande Naine', integrando análises agronômicas, nutricionais e ferramentas de visão computacional. O delineamento experimental contemplou a aplicação de doses crescentes de Si via solo e a quantificação das áreas foliares por métodos tradicionais e automatizados. Os resultados indicaram que doses intermediárias de Si favoreceram a preservação da área foliar sadia e o equilíbrio nutricional, enquanto a análise por visão computacional apresentou maior precisão e reprodutibilidade que a avaliação manual. Conclui-se que a integração entre nutrição silicatada e técnicas digitais de fenotipagem oferece avanços metodológicos e subsídios para o manejo da bananeira em condições de estresse térmico.

Palavras-chave: Banana, Silício, Estresse por frio, Visão computacional.

ABSTRACT

The banana (*Musa spp.*) is one of the most important tropical fruit crops worldwide; however, it shows high sensitivity to cold, which triggers leaf necrosis, reduces the photosynthetically active area, and compromises productivity. This stress represents a growing challenge due to the expansion of cultivation into subtropical regions and the intensification of extreme climatic events. In this context, silicon (Si) has emerged as a beneficial element associated with the alleviation of different abiotic stresses, although its specific role in banana cold tolerance remains not fully clarified. This dissertation aimed to evaluate the effects of different Si doses on the reduction of cold-induced leaf necrosis in young 'Grande Naine' plants, integrating agronomic and nutritional analyses with computer vision tools. The experimental design included the application of increasing Si doses via soil and the quantification of leaf areas through both traditional and automated methods. The results indicated that intermediate Si doses favored the preservation of healthy leaf area and nutritional balance, while computer vision analysis showed greater precision and reproducibility than manual evaluation. It is concluded that the integration of silicon nutrition and digital phenotyping techniques provides methodological advances and practical support for banana management under thermal stress conditions.

Keywords: Banana, Silicon, Cold Stress, Computer Vision.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Tratamentos submetidos a 4 °C e diferentes doses de silicato de cálcio. ...	22
Figura 2 Fluxograma de processamento de imagens no software ImageJ para análise de folhas de bananeira submetidas a estresse térmico.	23
Figura 3 Processamento de imagens. a) Imagem original da folha; b) Limiar; c) Resultado da análise de partículas; d) Imagem original da folha; e) Limiar; f) Resultado da análise de partículas.	24
Figura 4 Fluxograma de processamento automatizado de imagens para análise de folhas de bananeira utilizando técnicas clássicas de segmentação de imagens implementadas com a biblioteca OpenCV.	25
Figura 5 Processamento de imagens usando OpenCV. (a) Imagem original; (b) Perímetro foliar detectado usando detecção de bordas e contornos; (c) Máscara binária destacando áreas necróticas; (d) Segmentação final mostrando regiões necróticas isoladas.	26
Figura 6 Boxplots de áreas foliares (cm ⁻²) para diferentes doses de silício, comparando os métodos OpenCV e ImageJ. (a) Área total (cm ⁻²) das folhas para cada dose de silício, com comparação entre os métodos OpenCV e ImageJ. (b) Área sadia (cm ⁻²) das folhas para cada dose de silício, com comparação entre os métodos OpenCV e ImageJ. (c) Área necrótica (cm ⁻²) das folhas para cada dose de silício, com comparação entre os métodos OpenCV e ImageJ. As letras indicam diferenças entre os delineamentos fatoriais (2 x 6). Para (a) e (c) teste posthoc de Dunn e (b) teste posthoc de Tukey.	28
Figura 7 Teores foliares de nutrientes em plantas de bananeira ‘Grande Naine’ submetidas a doses crescentes de silicato de cálcio aplicadas ao solo: (a) Si (g kg ⁻¹), (b) Mg (g kg ⁻¹), (c) Mn (mg kg ⁻¹), (d) B (mg kg ⁻¹) e (e) S (g kg ⁻¹). Barras indicam desvio-padrão (n = 4). Diferentes letras sobre as caixas indicam diferenças significativas entre as doses pelo teste de Tukey ou Dunn ($\alpha = 0,05$).	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teores médios de nutrientes no solo conforme as doses de silicato aplicadas.	29
Tabela 2 – Teores médios de nutrientes foliares conforme as doses de silicato aplicadas.	31

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1 - Considerações gerais	1
1.	Introdução	1
2.	Revisão de Literatura	3
2.1	Bananicultura	3
2.2	Efeito do frio	5
2.3	Papel do silício	7
2.4	Fenotipagem Digital	8
	Referências	10
	CAPÍTULO 2 - Aplicação de visão computacional na quantificação de danos por frio em folhas de bananeiras submetidas a diferentes níveis de silício	18
1.	Introdução	19
2.	Material e Métodos	20
2.1	Caracterização Experimental	20
2.2	Processamento de Imagens	22
2.2.2	Biblioteca OpenCV em Python	24
2.3	Análise Estatística	26
3.	Resultados	27
4.	Discussão	32
5.	Conclusão	34
	Referências	35
	CAPÍTULO 3 - Considerações finais	41

CAPÍTULO 1 - Considerações gerais

1. INTRODUÇÃO

A fruticultura é um dos setores mais relevantes da agricultura mundial, desempenhando papel estratégico para a segurança alimentar, com o fornecimento de nutrientes essenciais e a geração de renda em diferentes regiões (FAO, 2023). Entre as culturas tropicais de maior destaque está a banana (*Musa spp.*), que figura entre as frutas mais consumidas e comercializadas globalmente, constituindo importante fonte de receita para países da América Latina e da Ásia. O Brasil está entre os maiores produtores mundiais, reforçando a relevância econômica e social da bananicultura (Goenaga et al., 2019).

No entanto, apesar de sua importância, a bananeira é altamente sensível a condições de frio. Em regiões subtropicais ou sob ocorrência de eventos climáticos extremos, o estresse por baixas temperaturas provoca a injúria por resfriamento (*chilling injury*), que compromete processos fisiológicos e resulta em sintomas visíveis, como a necrose foliar (Xiao et al., 2023). Esse dano reduz a área fotossintética ativa, prejudica o desenvolvimento das plantas e compromete a qualidade e a produtividade da cultura (Sevillano et al., 2009).

A injúria por frio em plantas tropicais, como a bananeira, está diretamente associada a alterações fisiológicas. A redução da fluidez das membranas sob baixas temperaturas compromete a integridade celular, promovendo extravasamento de solutos e acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS), que desencadeiam necrose foliar (Steponkus, 1984; Prasad et al., 1994).

Esse estresse oxidativo pode ser parcialmente mitigado pela ativação de enzimas antioxidantes, como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), fundamentais para manter o equilíbrio redox e preservar o aparato fotossintético (Soitamo et al., 2008). Nesse contexto, a necrose foliar constitui um marcador agrônomo relevante, pois traduz tanto os danos fisiológicos do frio quanto a perda direta de área fotossintética funcional, refletindo-se na produtividade.

Diferentes estratégias vêm sendo investigadas para reduzir os efeitos do frio em plantas tropicais, destacando-se a aplicação de silício (Si) (Zargar et al., 2019). Embora não seja considerado essencial, o Si pode fortalecer a estrutura foliar,

aumentar a atividade antioxidante e preservar o aparato fotossintético, conferindo maior tolerância a estresses abióticos (Habibi, 2015).

Além disso, a resposta da bananeira ao frio pode ser modulada pela nutrição mineral. O silício, além de seus efeitos estruturais e antioxidantes, influencia a homeostase de nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, diretamente relacionados ao metabolismo foliar (Yin et al., 2016; Moradtalab et al., 2018). Assim, avaliar a necrose foliar em conjunto com os teores foliares de Si e macronutrientes torna-se fundamental para compreender a interação entre nutrição e tolerância ao estresse térmico.

Contudo, em plantas de bananeira em fase vegetativa, a avaliação da eficácia do silício frente ao estresse por frio permanece pouco explorada. Ainda não existem metodologias consolidadas que permitam quantificar, de forma objetiva e reprodutível, a necrose foliar — principal sintoma agrônomo da injúria pelo frio observada em campo.

Tradicionalmente, a quantificação da necrose foliar tem sido realizada por meio de avaliações visuais ou pela seleção manual das áreas lesionadas em imagens digitais, procedimentos trabalhosos e suscetíveis à subjetividade do avaliador (Weber et al., 2019). O software ImageJ consolidou-se como ferramenta de fenotipagem vegetal, amplamente utilizada para medições de área foliar (Schneider et al., 2012). Mais recentemente, bibliotecas de visão computacional como o Open Source Computer Vision Library (OpenCV) têm sido exploradas como alternativas promissoras para a automatização de análises em fenotipagem digital (Bradski, 2000).

Assim, torna-se necessário estabelecer protocolos de fenotipagem digital que permitam avaliar, de forma objetiva e reprodutível, a influência do silício na tolerância da bananeira ao frio. Diante desse contexto, este estudo busca integrar a agronomia, ao investigar o papel do silício na mitigação dos danos causados pelo frio em bananeiras da cultivar Grande Naine (*Musa acuminata* 'Grand Nain'), e a tecnologia, ao desenvolver e validar um protocolo de fenotipagem digital para quantificação objetiva da necrose foliar.

5. Conclusão

A aplicação de silício, na forma de silicato de cálcio, mostrou-se eficaz na mitigação do estresse térmico por frio em bananeiras, com destaque para as doses intermediárias (D2–D4), que preservaram a área foliar total e sadia e reduziram a necrose, confirmando o papel do elemento na integridade funcional das plantas. Esses resultados refletem a atuação conjunta de mecanismos estruturais, nutricionais e bioquímicos, evidenciada pelo reforço das paredes celulares, pela maior disponibilidade de nutrientes essenciais (Mg, Mn, S e B) e pela ativação de defesas antioxidantes, fatores que atuaram sinergicamente para sustentar o desempenho fisiológico sob frio. Paralelamente, a utilização do OpenCV para segmentação e quantificação foliar demonstrou maior sensibilidade, reprodutibilidade e poder discriminatório que abordagens manuais, destacando-se como ferramenta promissora para análises agronômicas em larga escala. Assim, este estudo contribui tanto para a validação do silício como estratégia agronômica em condições de baixa temperatura

quanto para a consolidação da visão computacional como método eficiente de fenotipagem digital.

Referências

ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. *Encyclopedia of Research Design*. [s. l.: s. n.], [n. d.]. Disponível em: <http://www.utd.edu/~herve>. Acesso em: 24 set. 2025.

ABDULLAH, M. M.; WARAICH, E. A.; AHMAD, M.; HUSSAIN, S.; ASGHAR, H. N.; HAIDER, A.; ZULFIQAR, U.; AHMAD, Z.; SOUFAN, W.; PRASAD, P. V.; DJALOVIC, I. Improving soybean drought tolerance via silicon-induced changes in growth, physiological, biochemical, and root characteristics. *Plant Signaling & Behavior*, v. 20, n. 1, p. 2465232, 2025. <https://doi.org/10.1080/15592324.2025.2465232>

ALOTAIBI, S. S.; ALAZWARI, S.; BASHETI, I.; ALGHUSHAIRY, O.; YAFOZ, A.; ALSINI, R.; SHOIE ALALLAH, F.; ALOTAIBI, S. S. Pyramid Channel-based Feature Attention Network with Ensemble Learning based UAV image classification on IoT assisted remote sensing environment. *Fractals*, v. 16, p. 2540012, 2024. <https://doi.org/10.1142/S0218348X25400122>

ARCHANA, U.; KHAN, A.; SUDARSHANAM, A.; SATHYA, C.; KOSHARIYA, A. K.; KRISHNAMOORTHY, R. Plant disease detection using ResNet. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INVENTIVE COMPUTATION TECHNOLOGIES (ICICT), 6., 2023. *Proceedings...* [s. l.: s. n.], 2023. p. 614–618. <https://doi.org/10.1109/ICICT57646.2023.10133938>

ARIZA-SENTÍS, M.; VÉLEZ, S.; MARTÍNEZ-PEÑA, R.; BAJA, H.; VALENTE, J. Object detection and tracking in precision farming: a systematic review. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 219, p. 108757, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108757>

AVESTAN, S.; GHASEMNEZHAD, M.; ESFAHANI, M.; BARKER, A. V. Effects of nanosilicon dioxide on leaf anatomy, chlorophyll fluorescence, and mineral element composition of strawberry under salinity stress. *Journal of Plant Nutrition*, v. 44, n. 20, p. 3005–3019, 2021. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1936036>

BRADSKI, G.; KAEHLER, A. *Learning OpenCV*. [s. l.]: Academia, 2008a. 576 p. Disponível em: https://www.academia.edu/40548016/Learning_OpenCV. Acesso em: 24 set. 2025.

BRADSKI, G.; KAEHLER, A. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. 1. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2008b.

CANNY, J. A computational approach to edge detection. In: FISCHLER, M. A.; FIRSCH, O. (Ed.). *Readings in Computer Vision*. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1987. p. 184–203. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-051581-6.50024-6>

CHANG, L. Y.; BRECHT, J. K. Comparative analysis of mature green banana volatile compounds during development of chilling injury as influenced by 1-MCP. *Acta Horticulturae*, v. 1396, p. 593–600, 2024. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2024.1396.79>

CHANG, L. Y.; BRECHT, J. K. Early chilling injury symptom development and recovery of mature green banana: involvement of ethylene under different severities of chilling stress. *Horticulturae*, v. 10, n. 10, p. 1050, 2024. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10101050>

CHEN, Y.; ZHANG, Y.; CHEN, H.; XIANG, J.; SHENG, H.; YANG, Y.; TIAN, X.; ZHANG, Y. Effects of rockwool and silicon fertilizer on growth and low temperature tolerance of rice seedlings. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, v. 39, n. 5, p. 1050–1060, 2025. <https://doi.org/10.11869/J.ISSN.1000-8551.2025.05.1050>

DABRAVOLSKI, S. A.; ISAYENKOV, S. V. The physiological and molecular mechanisms of silicon action in salt stress amelioration. *Plants*, v. 13, n. 4, p. 525, 2024. <https://doi.org/10.3390/plants13040525>

DAS CHOUDHURY, S.; SAMAL, A.; AWADA, T. Leveraging image analysis for high-throughput plant phenotyping. *Frontiers in Plant Science*, v. 10, p. 508, 2019. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00508>

DE SOUZA JÚNIOR, J. P.; DE MELLO PRADO, R.; CAMPOS, C. N. S.; TEIXEIRA, G. C. M.; FERREIRA, P. M. Nanosilica-mediated plant growth and environmental stress tolerance in plants: mechanisms of action. In: HOSSAIN, M. A.; et al. (Ed.). *Silicon and*

Nano-Silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement: Progress and Prospects. [s. l.]: Academic Press, 2022. p. 325–337. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91225-9.00023-6>

DUNN, O. J. Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics*, v. 6, n. 3, p. 241, 1964. <https://doi.org/10.2307/1266041>

FAO. Banana market review: preliminary results 2019. Rome: FAO, 2020. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6277be9c-f5d0-4514-b311-691d3483ba3c/content>. Acesso em: 24 set. 2025.

FAOSTAT. Crops and livestock products – Bananas, production quantity. Rome: FAO, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 24 set. 2025.

FIGUEROA-YÁÑEZ, L.; CANO-SOSA, J.; CASTAÑO, E.; ARROYO-HERRERA, A. L.; CAAMAL-VELAZQUEZ, J. H.; SANCHEZ-TEYER, F.; LÓPEZ-GÓMEZ, R.; DE LOS SANTOS-BRIONES, C.; RODRÍGUEZ-ZAPATA, L. Phylogenetic relationships and expression in response to low temperature of a catalase gene in banana (*Musa acuminata* cv. Grand Nain) fruit. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, v. 109, n. 3, p. 429–438, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11240-011-0107-4>

FISHER, R. A. *Statistical methods for research workers*. New York: Springer, 1992. p. 66–70. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9_6

HABIBI, G. Effects of soil- and foliar-applied silicon on the resistance of grapevine plants to freezing stress. *Acta Biologica Szegediensis*, v. 59, n. 2, p. 109–117, 2015.

HASHIM, N.; JANIUS, R. B.; RAHMAN, R. A.; OSMAN, A.; SHITAN, M.; ZUDE, M. Changes of backscattering parameters during chilling injury in bananas. *Journal of Engineering Science and Technology*, v. 9, n. 3, p. 314–325, 2014.

HASHIM, N.; PFLANZ, M.; REGEN, C.; JANIUS, R. B.; ABDUL RAHMAN, R.; OSMAN, A.; SHITAN, M.; ZUDE, M. An approach for monitoring the chilling injury appearance in bananas by means of backscattering imaging. *Journal of Food Engineering*, v. 116, n. 1, p. 28–36, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.11.018>

HUNTER, J. D. Matplotlib: a 2D graphics environment. *Computing in Science and Engineering*, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>

IBGE. Produção agrícola municipal – PAM. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022.

IQBAL, S.; HUSSAIN, M.; SADIQ, S.; SELEIMAN, M. F.; SARKHOSH, A.; CHATER, J. M.; SHAHID, M. A. Silicon nanoparticles confer hypoxia tolerance in citrus rootstocks by modulating antioxidant activities and carbohydrate metabolism. *Heliyon*, v. 10, n. 1, e22960, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22960>

KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, v. 47, n. 260, p. 583, 1952. <https://doi.org/10.2307/2280779>

LEI, F.; PAN, X.; LIN, H.; ZHANG, Z.; ZHANG, W.; TAN, H.; YANG, M.; LIU, H. Silicon improves the plant growth and fruit quality of cherry tomato (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*) under nitrogen imbalance by modulating nitrogen assimilation and photosynthesis. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 24, n. 3, p. 5208–5219, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01902-x>

LEONARDI, A. A. S.; AMJADRASID, R.; BUDI, E. M. Comparison study of various color and contour-based pumpkin counter method for aerial farm monitoring. *AIP Conference Proceedings*, v. 2366, 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0060217>

LEVENE, H. Robust tests for equality of variances. In: OLKIN, I. G. S. G.; HOTELLING, H. (Ed.). *Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling*. Stanford: Stanford University Press, 1960. p. 278–292.

LIU, X.; WANG, S.; XU, L.; YUAN, Q.; MA, S.; YU, C.; NIU, C.; CHEN, C.; YUAN, X.; ZENG, J. Real-time color recognition of moving raisin based on OpenCV. *Nongye Gongcheng Xuebao – Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, v. 35, n. 23, p. 177–184, 2019. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.022>

OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 9, n. 1, p. 62–66, 1979.

PÉREZ-PATRICIO, M.; OSUNA-COUTIÑO, J. A. de J.; RÍOS-TOLEDO, G.; AGUILAR-GONZÁLEZ, A.; CAMAS-ANZUETO, J. L.; MORALES-NAVARRO, N. A.; VELÁZQUEZ-GONZÁLEZ, J. R.; CUNDAPÍ-LÓPEZ, L. Á. Plant stress detection using

a three-dimensional analysis from a single RGB image. *Sensors*, v. 24, n. 23, p. 7860, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24237860>

POLLY, R.; DEVI, E. A. Semantic segmentation for plant leaf disease classification and damage detection: a deep learning approach. *Smart Agricultural Technology*, v. 9, p. 100526, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100526>

RACHAPPANAVAR, V.; KUMAR, M.; NEGI, N.; CHOWDHURY, S.; KAPOOR, M.; SINGH, S.; RUSTAGI, S.; RAI, A. K.; SHREAZ, S.; NEGI, R.; YADAV, A. N. Silicon-derived benefits to combat biotic and abiotic stresses in fruit crops: current research and future challenges. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 211, p. 108680, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108680>

RAHMAN, K. S.; RAKIB, M. R. I.; SALEHIN, M. M.; ALI, M. R.; RAHMAN, A. Assessment of paddy leaves disease severity level using image processing technique. *Smart Agricultural Technology*, v. 7, p. 100410, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100410>

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, v. 9, n. 7, p. 671–675, 2012. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, v. 52, n. 3/4, p. 591, 1965. <https://doi.org/10.2307/2333709>

SZYMAŃSKA, R.; ORZECOWSKA, A.; TRELA-MAKOWEJ, A. Nanocząstki krzemu w zrównoważonym rolnictwie. *Postępy Biochemii*, v. 70, n. 4, p. 447–461, 2024. https://doi.org/10.18388/pb.2021_574

TUKEY, J. W. The problem of multiple comparisons. [s. l.]: [s. n.], 1949.

WANG, J.; HE, J.; HAN, Y.; OUYANG, C.; LI, D. An adaptive thresholding algorithm of field leaf image. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 96, p. 23–39, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.04.014>

WU, Y.; BAI, L.; DAI, X.; BA, L.; WAN, J.; LIANG, W.; LIN, H.; FAN, Z. Comparative transcriptomic analysis reveals the reactive oxygen species metabolism involving in melatonin-alleviated chilling injury in postharvest banana fruit. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 222, p. 109693, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.109693>

XIAO, L.; JIANG, X.; DENG, Y.; XU, K.; DUAN, X.; WAN, K.; TANG, X. Study on characteristics and lignification mechanism of postharvest banana fruit during chilling injury. *Foods*, v. 12, n. 5, 2023. <https://doi.org/10.3390/foods12051097>

XIE, X.; YANG, S.; ZHAO, X.; SHANG, T.; HAN, X. Mechanisms of silicon-mediated amelioration for *Camellia sinensis* using physiology, transcriptomics, and metabolomics under cold stress. *Beverage Plant Research*, v. 5, n. 1, p. e003, 2025. <https://doi.org/10.48130/BPR-0024-0034>

YANG, T.; ZHOU, S.; XU, A.; YE, J.; YIN, J. An approach for plant leaf image segmentation based on YOLOv8 and the improved DEEPLABV3+. *Plants*, v. 12, n. 19, p. 3438, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12193438>

ZHANG, R.; WANG, M.; LIU, P.; ZHU, T.; QU, X.; CHEN, X.; XIAO, X. Flexible Vis/NIR sensing system for banana chilling injury. *Postharvest Biology and Technology*, v. 207, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112623>

ZHOU, X.; KANG, Z.; HAN, J.; YAN, H.; FENG, X. Research on measuring surface porosity of cooked rice based on computer image technology. *Journal of Henan University of Technology Natural Science Edition*, v. 46, n. 1, p. 83–89, 2025. <https://doi.org/10.16433/j.1673-2383.202405070003>