

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Fluorescência de clorofila e análise multiespectral de imagens para
avaliação da qualidade de sementes de cenoura e tomate**

Patrícia Aparecida Galletti

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2020**

Patrícia Aparecida Galletti
Engenheira Agrônoma

**Fluorescência de clorofila e análise multiespectral de imagens para avaliação da
qualidade de sementes de cenoura e tomate**

Orientador:
Profª. Dra. **CLÍSSIA BARBOZA DA SILVA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Galletti, Patrícia Aparecida

Fluorescência de clorofila e análise multiespectral de imagens para avaliação da qualidade de sementes de cenoura e tomate / Patrícia Aparecida Galletti. - - Piracicaba, 2020.

79 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Aprendizado de máquina 2. Quimiometria 3. Floresta aleatória 4. Análise discriminante quadrática 5. Eficiência quântica do fotossistema II 6. *Daucus carota* L. 7. *Solanum lycopersicum* L. . I. Título

DEDICATÓRIA

À minha família, que é copa e raiz, que é ombro e que é chão, que é sonho,
porém é também realidade:

Minha mãe, *Laudinea Aparecida de Carvalho*

Minhas irmãs, *Victória Galletti e Geovanna Carvalho da Silveira*

Meus queridos avós, *Clarice Babosa de Carvalho e Antônio Oliveira de Carvalho*

E meu pai, *Dirceu Antônio Galletti*.

Dedico este trabalho de alguns poucos anos a estas pessoas que me ensinaram tantos valores fundamentais, mas principalmente o valor do amor. Que me ajudaram a me tornar quem eu sou hoje. Vocês são meu “tudo” e pra quem tudo eu faço. Sou imensamente grata a Deus pela benção que é tê-los como minha família.

AGRADECIMENTOS

À força criadora que rege o universo, que é princípio, meio e fim, fonte de amor, sabedoria e força.

À espiritualidade amiga pelo amparo e por transmitir e pregar o amor, a sabedoria e a força que advém do criador.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo – Esalq/USP, pela oportunidade de realização do mestrado.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Clíssia Barboza da Silva, pela paciência em ensinar, pela compreensão quando errei e quando tive dificuldades, pessoais ou acadêmicas, por acreditar no meu trabalho e principalmente pelo grande incentivo. Não tenho palavras que possam dimensionar o quanto me inspirou e me ensinou, não apenas pela sua experiência na área de estudo, mas pelo exemplo de ser humano que é. Sinto-me privilegiada pela oportunidade de ser orientada por alguém tão especial e competente.

Ao Prof. Dr. Júlio Marcos Filho, pela oportunidade de orientação nos sete primeiros meses do mestrado. Sou muito grata pela confiança, ao ter me indicado à Prof.^a Dr.^a Clíssia Barboza da Silva e pelos ensinamentos e experiências compartilhadas.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (processos 2017/15220-7, 2018/03793-5, 2018/03802-4, 2018/03807-6, 2018/24777-8) pela concessão da bolsa de mestrado e demais auxílios financeiros, tornando possível a realização desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa concedida entre 01 de março a 31 de dezembro de 2018.

A Universidade Virtual do Estado de São Paulo – Univesp, pela concessão da bolsa a partir de 01 de abril de 2020, por meio do Programa de Cooperação de Formação Didático-Pedagógico USP/Univesp.

Às empresas Phenovation, Faxitron e Videometer por todo o suporte e informações fornecidas ao longo da condução da pesquisa.

Às empresas Sakata, Feltrin, Agristar, Horticeres e ISLA por fornecer as sementes utilizadas nesta pesquisa.

Aos professores da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia e outros programas, que fizeram parte da minha trajetória acadêmica nesta Escola, especialmente aos professores Dr. Francisco Guilhien Gomes Junior, Dr. Silvio Moure Cicero e Dr. Júlio Marcos Filho pelos valiosos conhecimentos transmitidos na área de tecnologia de sementes e pelo auxílio em minha pesquisa de mestrado.

Ao professor Dr. Valter Arthur pelo espaço cedido no Laboratório de Radiobiologia e Ambiente do Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo (USP/Cena), para conclusão da minha pesquisa.

Aos colegas Welinton Yoshio Hirai e Vivian Aparecida Brancaglioni pelas análises estatísticas. Meu trabalho com certeza não teria a mesma qualidade se não fosse por essa grande contribuição. Sou muito grata pela dedicação e paciência.

À Marcia Carvalho por sua valiosa contribuição. Obrigada por ajudar a tornar esse trabalho melhor.

À MSc. Helena Chamma pela amizade, paciência em ensinar, dedicação, pelo trabalho impecável que desempenha e por oferecer tão gentilmente sua ajuda e conhecimento aos que utilizam o Laboratório de Análise de Sementes.

Aos funcionários da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, em especial ao Adilson, Ananias, David, Hodair, João e Luis Claudio do Departamento de Produção Vegetal e Lucia Cristina do Laboratório de Radiobiologia e Ambiente do Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Agradeço pela amizade e apoio.

Às secretárias do programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Luciane Lopes Toledo e Angela Marcia Derigi Silva por todo o auxílio e atenção.

Aos funcionários da Biblioteca Central da Esalq pelo atendimento e atenção dispensada.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Tecnologia de Sementes: Abimael Filho, Andres Trujillo, Antônio dos Anjos, Artur Silva, Bruno Cardillo, Carlos Henrique Rego, Fabiano França, Glória Ribeiro, Gustavo Roberto, Julia Rocha, Livia Rohr, Lucas Capelaro, Mayara Rodrigues, Nielsen Moreira, Rafael Alves. Sou muito grata pela amizade, ajuda com os trabalhos de pesquisa e de disciplinas, parceria e pelos valiosos momentos compartilhados, que serão guardados com muito carinho na minha memória.

À minha orientadora de Iniciação Científica, Prof.^a Dr.^a Érica Marusa Pergo Coelho por todos os ensinamentos, por ter acreditado em mim e ter me incentivado a fazer o processo seletivo em uma Universidade que sonhava em estudar.

À Michele da Cruz Accácio por acreditar em mim, mesmo quando eu mesma não acreditei, e por todo apoio dado para que eu pudesse estar aqui.

Aos amigos Maicon Javorski e Allan Patrick, que me acolherem e apoiaram tanto, sem nem ainda me conhecerem e que se tornaram grandes amigos. Vocês são pessoas especiais e iluminadas. Sou grata pela valiosa amizade.

À minha amiga Camila Ronchini Montalvão por compartilhar tantas reflexões importantes, por me ajudar a crescer como pessoa e me apoiar tanto.

Aos queridos amigos de longa data, e que, mesmo de longe, me apoiaram em tantos momentos: Bruno Teixeira, Bruno Henrique, Danilo Ratti, Jean Sanches, Lorena Zacharias, Matheus Kleparde, Núbia Fonesi e Vitoria Anversi.

Às companheiras de lar Thaise Dieminger, Mayara Rodrigues e Marcela Sant'Anna, que dividiram o teto e tantos momentos especiais comigo, às vezes de dificuldade, mas muitas vezes de alegria. E também às amigas Daniele Fontana, Jackellyne Bruna, Isabela Sabrina e Ana Flávia Boeni e ao meu amigo Luis Fernando Merloti. Vocês compuseram a minha família piracicabana. Obrigada pela amizade essencial.

Ao Ruan Furtado, que me conhece a tão pouco tempo, mas vê tanto em mim. Sou grata pelo carinho, apoio e por me fazer acreditar em coisas tão bonitas. Você é uma pessoa muito especial na minha vida.

Ao Centro Espírita Aprendizizes do Evangelho por oferecer tantos ensinamentos valiosos e pela oportunidade de crescimento pessoal e espiritual, o que me ajudou imensamente nos momentos difíceis.

À Evelyn Mattos, pessoa tão iluminada e querida, excelente profissional, que me auxiliou tanto na minha trajetória durante o Mestrado.

Aos amigos de caminhada não mencionados e a todos que de alguma maneira contribuíram para que esse trabalho fosse realizado, para meu crescimento pessoal e profissional:

Meus sinceros agradecimentos.



*"All we have to decide is what to do
with the time that is given us." (Gandalf)*

The Lord of the Rings, J. J. R. Tolkien

SUMÁRIO

RESUMO	13
ABSTRACT	15
1. INTRODUÇÃO.....	17
2. REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1. Aspectos gerais da cultura da cenoura e do tomate	19
2.2. Qualidade de sementes	19
2.3. Métodos convencionais para avaliação do potencial fisiológico de sementes	20
2.4. Métodos não destrutivos para avaliação do potencial fisiológico de sementes.....	21
2.4.1. Análise de imagens de fluorescência de clorofila	21
2.4.1.1. Relação do conteúdo de clorofila, maturação e potencial fisiológico	21
2.4.1.2. Desuniformidade de maturação	23
2.4.1.3. Fluorescência de clorofila e potencial fisiológico de sementes.....	24
2.4.1.4. Fluorescência de clorofila e fotossíntese de plântulas.....	25
2.4.2. Análise de imagens multiespectrais.....	27
2.4.3. Análise de imagens de raios X	29
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1. Análise do potencial fisiológico	32
3.1.1. Germinação.....	32
3.1.2. Envelhecimento acelerado com solução saturada de sal (EASS).....	32
3.1.3. Emergência de plântulas.....	33
3.1.4. Análise computadorizada de imagens de plântulas (SVIS).....	33
3.2. Análise de imagens de fluorescência de clorofila	34
3.2.1. SeedReporter	34
3.2.2. VideometerLab4	36
3.3. Análise de imagens multiespectrais.....	37
3.4. Análise de imagens de raios X	38
3.5. Eficiência do fotossistema II, fluorescência e índice de clorofila em plântulas.....	39
3.6. Procedimento estatístico	40
4. RESULTADOS	43
4.1. Análise do potencial fisiológico	43
4.2. Análise de imagens de fluorescência de clorofila em sementes.....	43

4.3. Análise de imagens multiespectrais	48
4.4. Identificação de aspectos morfológicos internos por imagens de raios X	54
4.5. Análise de imagens de eficiência do fotossistema II, índice e fluorescência de clorofila em plântulas	58
5. DISCUSSÃO	61
5.1. Fluorescência de clorofila e discriminação de cultivares.....	61
5.2. Fluorescência de clorofila e classificação do vigor de sementes	61
5.3. Análise multispectral de imagens baseada em quimiometria para discriminação de cultivares e vigor de sementes	62
5.4. Bandas espectrais selecionadas por algoritmo de aprendizado de máquina no contexto da qualidade de sementes.....	63
5.5. Imagens de raios X e aspectos morfológicos internos de sementes: relação com as técnicas de fluorescência de clorofila e análise multiespectral de imagens.....	64
5.6. Eficiência do fotossistema II, índice e fluorescência de clorofila em plântulas obtidas de lotes de sementes de alto e baixo vigor	65
6. CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS.....	69

RESUMO

Fluorescência de clorofila e análise multiespectral de imagens para avaliação da qualidade de sementes de cenoura e tomate

Métodos ópticos têm sido amplamente desenvolvidos para avaliação da qualidade de sementes, a fim de atender à crescente demanda da indústria agrícola e alimentícia. A fluorescência de clorofila e a análise multiespectral de imagens destacam-se como tecnologias rápidas, não destrutivas e precisas, com a geração de informações consistentes sobre diferentes atributos da qualidade de sementes. Esta pesquisa objetivou estudar uma nova abordagem baseada em recentes métodos ópticos para a análise do potencial fisiológico de sementes de tomate e cenoura. Foram utilizadas sementes de tomate dos cultivares Gaúcho e Tyna, representados por três e quatro lotes, respectivamente, e sementes de cenoura dos cultivares Brasília e Francine, representados por quatro lotes cada. O trabalho foi dividido em cinco etapas: 1) análise do potencial fisiológico (germinação e vigor); 2) análise de imagens de fluorescência de clorofila nas combinações de excitação e emissão de 620/730 nm, 630/700 nm, 645/700 nm e 660/700 nm; 3) análise de imagens multiespectrais em 19 comprimentos de onda (365 a 970 nm); 4) análise de imagens de raios X; 5) análise de fotossíntese, fluorescência e índice de clorofila em plântulas. Foram empregados métodos de quimiometria aos dados multiespectrais baseados em análise de componentes principais (PCA), floresta aleatória (RF) e análise discriminante quadrática (QDA). As imagens de fluorescência de clorofila nas combinações de 620/730 nm (tomate) e 660/700 nm (cenoura), possibilitaram a identificação de lotes de sementes de potenciais fisiológicos distintos, além disso, as combinações de 620/730 nm (tomate) e 645/700 nm (tomate e cenoura), permitiram a discriminação de sementes entre cultivares. A análise dos dados multiespectrais empregando a PCA, possibilitou a distinção de sementes entre os cultivares de cenoura, mas isso não foi possível entre os cultivares de tomate. O classificador baseado no algoritmo RF revelou as bandas mais significativas para identificação do vigor das sementes, com destaque para os comprimentos de onda de 365, 570, 590, 660 e 690 nm em tomate, e de 365, 405, 430, 940 e 970 nm em cenoura. O modelo de QDA criado com as bandas mais significativas da RF, apresentou alta precisão na identificação de lotes de sementes de maior e menor vigor, com classificação correta variando entre 89 e 94% em lotes de sementes de tomate e entre 86 e 97% em lotes de sementes de cenoura. Sementes imaturas de tomate de cenoura apresentaram maior proporção de espaços internos vazios, identificados por meio das imagens radiográficas, maior fluorescência de clorofila e maior reflectância multiespectral. As sementes de tomate de menor vigor produziram plântulas com capacidade fotossintética reduzida, maior fluorescência de clorofila e menor índice de clorofila. Em conclusão, as técnicas de fluorescência da clorofila e de imagens multiespectrais (aliadas aos métodos quimiométricos), constituem ferramentas eficazes para análise não destrutiva e confiável do potencial fisiológico de sementes de tomate e cenoura. Diante da crescente demanda da indústria agrícola e de alimentos, essas novas abordagens poderão contribuir de forma eficaz em programas de controle de qualidade nas diversas fases de um sistema de produção de sementes, com o ranqueamento rápido, objetivo e preciso de lotes de sementes.

Palavras-chave: aprendizado de máquina, quimiometria, floresta aleatória, análise discriminante quadrática, eficiência quântica do fotossistema II, *Daucus carota* L., *Solanum lycopersicum* L.

ABSTRACT

Chlorophyll fluorescence and multispectral imaging for carrot and tomato seed quality evaluation

Optical methods have been extensively explored for assessing seed quality, in order to meet the growing demand from the agricultural and food industry. Chlorophyll fluorescence and multispectral imaging are rapid, non-destructive and accurate technologies that can generate consistent information on different seed quality traits. This research aimed to investigate a new approach using recent methods to analyze the physiological potential of tomato and carrot seeds. We used tomato seeds from Gaúcho and Tyna cultivars represented by three and four lots, respectively, and carrot seeds from Brasília and Francine cultivars, each represented by four lots. This research was divided into five stages: 1) physiological potential tests (germination and vigor); 2) chlorophyll fluorescence analysis at 620/730 nm, 630/700 nm, 645/700 nm and 660/700 nm excitation/emission combinations; 3) multispectral imaging at 19 wavelengths (365 to 970 nm); 4) X-ray imaging; 5) photosynthesis, chlorophyll fluorescence and chlorophyll index of seedlings. Chemometrics methods based on principal component analysis (PCA), random forest (RF) and quadratic discriminant analysis (QDA) were applied to the multispectral data. Chlorophyll fluorescence images at 620/730 nm (tomato) and 660/700 nm (carrot) allow the discrimination of seed lots with different physiological potential, in addition, the combinations of 620/730 nm (tomato) and 645/700 nm (tomato and carrot) were feasible to discriminate cultivars. Using a PCA method, the multispectral data discriminated carrot cultivars, but not tomato cultivars. The RF algorithm revealed the most meaningful wavelengths for seed vigor classification: 365, 570, 590, 660 and 690 nm in tomato seeds, and 365, 405, 430, 940 and 970 nm in carrot seeds. The QDA model based on the five most meaningful wavelengths assigned by the RF algorithm showed high precision in distinguishing seeds with higher-vigor from seeds with lower-vigor, with accuracies varying between 89 and 94% in tomato seed lots and between 86 and 97% in carrot seed lots. Immature tomato and carrot seeds showed a higher proportion of internal empty spaces observed by the radiographic images, higher chlorophyll fluorescence and higher multispectral reflectance. Tomato seeds with lower-vigor produced seedlings with reduced photosynthesis capacity, higher chlorophyll fluorescence and lower chlorophyll index. In conclusion, chlorophyll fluorescence and chemometric-based multispectral imaging are efficient tools for non-destructive and reliable prediction of the physiological potential of tomato and carrot seed lots. In view of the growing demand in the agricultural and food industry, these new approaches could be potentially used in quality assurance programs through different seed production stages, with rapid, objective and accurate ranking of seed lots.

Keywords: machine learning, chemometrics, random forest, quadratic discriminant analysis, quantum efficiency of photosystem II, *Daucus carota* L., *Solanum lycopersicum* L.

1. INTRODUÇÃO

O tomate (*Solanum lycopersicum* L.) e a cenoura (*Daucus carota* L.) são importantes para a alimentação humana e estão entre as olerícolas mais consumidas mundialmente. Além disso, a demanda por essas duas espécies tem crescido por serem versáteis, com diversas utilizações industriais. As plantas de tomate e cenoura são multiplicadas por meio de sementes, portanto, o uso de sementes de alta qualidade é fundamental para o sucesso no estabelecimento do estande de plantas. O potencial fisiológico, um dos atributos da qualidade de sementes, é representado pela germinação e o vigor das sementes, e reflete a emergência de plântulas em campo sob condições ambientais adversas e a capacidade de armazenamento das sementes. Os testes convencionais empregados para avaliação da germinação e do vigor, embora comprovadamente eficazes, confiáveis e oferecerem informações valiosas, apresentam diversas limitações, particularmente por gerarem informações subjetivas que dependem de inspeções visuais e interpretação do analista.

Nesse sentido, os métodos baseados em análise de imagens digitais podem desempenhar um papel estratégico na estimativa e autenticação da qualidade de sementes. Dentre as mais recentes técnicas não destrutivas, que têm sido amplamente investigadas por apresentarem resultados satisfatórios na determinação do potencial fisiológico de sementes, destacam-se a análise de imagens de fluorescência de clorofila e a análise multiespectral de imagens.

A técnica de análise de imagens de fluorescência de clorofila tem se destacado particularmente na identificação de sementes com diferentes níveis de maturação em lotes comerciais. A desuniformidade de maturação das sementes de um lote é um problema recorrente, principalmente em espécies de crescimento indeterminado, como tomate e cenoura. Conforme o processo de maturação evolui, as clorofilas, que participam do processo de desenvolvimento das sementes tendem a serem degradadas. Portanto, baseando-se no princípio de que sementes colhidas imaturas possuem clorofila não degradada e são mais suscetíveis à deterioração, a técnica de fluorescência de clorofila possui potencial para estimar a qualidade do lote, visto que em geral, sementes maduras apresentam maior potencial fisiológico que as sementes imaturas.

A análise multiespectral de imagens também se destaca como ferramenta promissora na avaliação da qualidade de sementes por combinar dois métodos de análise, obtendo-se informações espaciais e espectrais. Assim, dados relacionados a aspectos visuais e características físico-químicas podem ser obtidos em uma única análise, que aliados a métodos

quimiométricos de análise de dados permitem a identificação de padrões relacionados ao potencial fisiológico das sementes de forma rápida e objetiva.

Em geral, plântulas oriundas de lotes de sementes de alta qualidade são mais vigorosas, e conseqüentemente, permitem estabelecimento satisfatório da cultura. Considerando que o período após a germinação é crítico, pois as plântulas em desenvolvimento precisam atingir o estado de autotrofia antes que os nutrientes armazenados sejam esgotados, a avaliação do vigor das plântulas constitui em estratégia importante para a produção agrícola. Logo, parâmetros relacionados à fotossíntese de plântulas podem ser utilizados, sendo as técnicas baseadas em fluorescência de clorofila uma opção não invasiva promissora.

Devido a demanda crescente por testes não destrutivos para a análise da qualidade de sementes, o objetivo do presente trabalho se constituiu em verificar a potencialidade do uso das técnicas de fluorescência de clorofila e análise multiespectral de imagens como indicadores do desempenho fisiológico de sementes de cenoura e tomate.

6. CONCLUSÕES

As técnicas de fluorescência de clorofila e de análise multiespectral de imagens (aliada aos métodos quimiométricos) constituem ferramentas eficazes para a análise não destrutiva e confiável do potencial fisiológico de sementes de tomate e cenoura, com discriminação de cultivares.

A combinação das técnicas de fluorescência de clorofila e análise de imagens multiespectrais possibilitam investigar novos aspectos biológicos de sementes de tomate e cenoura, com interpretação objetiva de conjuntos de dados. Além disso, permitem a identificação de plântulas com diferentes capacidades de conversão de energia, ou de atividade fotossintética.

Diante da crescente demanda na indústria de alimentos e agrícola, essas novas abordagens poderão contribuir de forma eficaz em programas de controle de qualidade nas diversas fases de um sistema de produção de sementes, com o ranqueamento rápido, objetivo e preciso de lotes de sementes.

REFERÊNCIAS

- Abud, H. F., Cicero, S. M., and Gomes-Junior, F. G. (2018). Radiographic images and relationship of the internal morphology and physiological potential of broccoli seeds. *Acta Sci. Agron.* 40, 1–9. doi:10.4025/actasciagron.v40i1.34950.
- Allorent, G., Courtois, F., Chevalier, F., and Lerbs-Mache, S. (2013). Plastid gene expression during chloroplast differentiation and dedifferentiation into non-photosynthetic plastids during seed formation. *Plant Mol. Biol.* 82, 59–70. doi:10.1007/s11103-013-0037-0.
- AOSA (2009). *Seed vigor testing handbook (Contribution to the Handbook on seed testing 32)*., eds. R. Baalbaki, S. Elias, J. Marcos Filho, and M. McDonald. Ithaca: Association of Official Seed Analysts.
- Atkinson, J. L., McCarty, L. B., Yelverton, F., McElroy, S., and Bridges, W. C. (2019). Doveweed (*Murdannia nudiflora*) response to environmental resource availability and cultural practices. *Weed Sci.* 67, 214–220. doi:10.1017/wsc.2018.89.
- Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59, 89–113.
- Baker, N. R., and Rosenqvist, E. (2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *J. Exp. Bot.* 55, 1607–1621. doi:10.1093/jxb/erh196.
- Barbedo, A. S. C., Peixoto, N., Câmara, F. L. A., Nakagawa, J., and Barbedo, C. J. (2004). Yield and quality of carrot seeds, cv. Brasília, as a result of plant population, gibberellic acid and stage of maturity. *Seed Sci. Technol.* 32, 119–134.
- Baud, S., and Lepiniec, L. (2010). Physiological and developmental regulation of seed oil production. *Prog. Lipid Res.* 49, 235–249. doi:10.1016/j.plipres.2010.01.001.
- Bergougnoux, V. (2014). The history of tomato: From domestication to biopharming. *Biotechnol. Adv.* 32, 170–189. doi:10.1016/j.biotechadv.2013.11.003.
- Bewley, J. D., Bradford, K., Hilhorst, H., and Nonogaki, H. (2013). *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy*. 3rd ed. doi:10.1007/978-1-4614-4693-4.
- Blackburn, G. A. (1998). Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: An evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sens. Environ.* 66, 273–285. doi:10.1016/S0034-4257(98)00059-5.
- Boelt, B., Shrestha, S., Salimi, Z., Jorgensen, J. R., Nicolaisen, M., and Carstensen, J. M. (2018). Multispectral imaging – a new tool in seed quality assessment? *Seed Sci. Res.* 28, 222–228.

- Borges, S. R. dos S., Silva, P. P. da, Araújo, F. S., Souza, F. F. de J., and Nascimento, W. M. (2019). Tomato seed image analysis during the maturation. *J. Seed Sci.* 41, 22–31. doi:10.1590/2317-1545v41n1191888.
- Brasil (2009). *Regras para análise de sementes*. Brasília: Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento.
- Che, W., Sun, L., Zhang, Q., Tan, W., Ye, D., Zhang, D., et al. (2018). Pixel based bruise region extraction of apple using Vis-NIR hyperspectral imaging. *Comput. Electron. Agric.* 146, 12–21. doi:10.1016/j.compag.2018.01.013.
- Cicero, S. M., Schoor, R. Van Der, and Jalink, H. (2009). Use of chlorophyll fluorescence sorting to improve soybean seed quality. *Rev. Bras. Sementes* 31, 145–151. doi:10.1590/s0101-31222009000400017.
- Costa, J. H., Cardoso, H. G., Campos, M. D., Zavattieri, A., Frederico, A. M., Melo, D. F. de, et al. (2009). *Daucus carota* L. - An old model for cell reprogramming gains new importance through a novel expansion pattern of alternative oxidase (AOX) genes. *Plant Physiol. Biochem.* 47, 753–759. doi:10.1016/j.plaphy.2009.03.011.
- Deleuran, L. C., Olesen, M. H., and Boelt, B. (2013). Spinach seed quality: Potential for combining seed size grading and chlorophyll fluorescence sorting. *Seed Sci. Res.* 23, 271–278. doi:10.1017/S0960258513000202.
- Dell'Aquila, A. (2007a). Pepper seed germination assessed by combined X-radiography and computer-aided imaging analysis. *Biol. Plant.* 51, 777–781.
- Dell'Aquila, A. (2007b). Towards new computer imaging techniques applied to seed quality testing and sorting. *Seed Sci. Technol.* 35, 519–538. doi:10.15258/sst.2007.35.3.01.
- Demir, I., and Ellis, R. H. (1992). Changes in seed quality during seed development and maturation in tomato. *Seed Sci. Res.* 2, 81–87. doi:10.1017/S0960258500001173.
- Demir, I., Kenanoglu, B. B., Jalink, H., and Mavi, K. (2013). Chlorophyll fluorescence sorting method to improve seedling emergence potential and vigour of commercial tomato and cucumber seed lots. *Int. J. Agric. For.* 3, 333–338. doi:10.5923/j.ijaf.20130307.12.
- Demir, I., and Samit, Y. (2001). Quality of tomato seeds as affected by fruit maturity at harvest and seed extraction method. *Gartenbauwissenschaft* 66, 199–202.
- Dias, D. C. F. S., Ribeiro, F. P., Dias, L. A. S., Silva, D. J. H., and Vidigal, D. S. (2006). Tomato seed quality in relation to fruit maturation and post-harvest storage. *Seed Sci. Technol.* 34, 691–699.
- Eastmond, P., Koláčá, L., and Rawsthorne, S. (1996). Photosynthesis by developing embryos of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *J. Exp. Bot.* 47, 1763–1769.

- doi:10.1093/jxb/47.11.1763.
- ElMasry, G., Mandour, N., Al-Rejaie, S., Belin, E., and Rousseau, D. (2019). Recent applications of multispectral imaging in seed phenotyping and quality monitoring – An overview. *Sensors* 19, 1090 (1–32). doi:10.3390/s19051090.
- FAOSTAT (2020). Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. Tomato and carrot production. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. [Accessed May 20, 2020].
- Figueiredo-González, M., Valentão, P., and Andrade, P. B. (2016). Tomato plant leaves: From by-products to the management of enzymes in chronic diseases. *Ind. Crops Prod.* 94, 621–629. doi:10.1016/j.indcrop.2016.09.036.
- Finch-Savage, W. E., and Bassel, G. W. (2015). Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. *J. Exp. Bot.* 67, 567–591. doi:10.1093/jxb/erv490.
- França-Neto, J., Pádua, G., Carvalho, M., Costa, O., Brumatti, P., Krzyzanowski, F., et al. (2005). Semente esverdeada de soja e sua qualidade fisiológica. *Circ. Técnica - EMBRAPA Soja (Brazil)*. 38, 1–8.
- França-Neto, J., Pádua, G., Krzyzanowski, F., Carvalho, M., Henning, A., and Lorini, I. (2012). Semente esverdeada de soja: causas e efeitos sobre o desempenho fisiológico - Série Sementes. 1–16.
- França-Silva, F., Rego, C. H. Q., Gomes-Junior, F. G., Moraes, M. H. D. de, Medeiros, A. D. de, and Silva, C. B. da (2020). Detection of *Drechslera avenae* (Eidam) sharif [*Helminthosporium avenae* (Eidam)] in black oat seeds (*Avena strigosa* Schreb) using multispectral imaging. *Sensors* 20, 3343. doi:10.3390/s20123343.
- Galili, G., Avin-Wittenberg, T., Angelovici, R., and Fernie, A. R. (2014). The role of photosynthesis and amino acid metabolism in the energy status during seed development. *Front. Plant Sci.* 5, 1–6. doi:10.3389/fpls.2014.00447.
- Giannelos, P. N., Sxizas, S., Lois, E., Zannikos, F., and Anastopoulos, G. (2005). Physical, chemical and fuel related properties of tomato seed oil for evaluating its direct use in diesel engines. *Ind. Crops Prod.* 22, 193–199. doi:10.1016/j.indcrop.2004.11.001.
- Gitelson, A. A., Gritz, Y., and Merzlyak, M. N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J. Plant Physiol.* 160, 271–282. doi:10.1078/0176-1617-00887.
- Grulichová, M., Mendel, P., Trojan, V., and Vyhnánek, T. (2018). Determination of chlorophyll and carotenoids present in the seeds of the plant family apiaceae and the impact on seed quality. *Acta Univ. Agric. Silv. Mendelianae Brun.* 66, 859–869. doi:10.11118/actaun201866040859.

- Hansen, M. A. E., Hay, F. R., and Carstensen, J. M. (2016). A virtual seed file: the use of multispectral image analysis in the management of genebank seed accessions. *Plant Genet. Resour. Characterisation Util.* 14, 238–241. doi:10.1017/S1479262115000362.
- Havaux, M. (2014). Carotenoid oxidation products as stress signals in plants. *Plant J.* 79, 597–606. doi:10.1111/tpj.12386.
- Hemender, Sharma, S., Mor, V. S., Jitender, and Bhuker, A. (2018). Image analysis: A modern approach to seed quality testing. *Curr. J. Appl. Sci. Technol.* 27, 1–11. doi:10.9734/cjast/2018/40945.
- Howitt, C. A., and Pogson, B. J. (2006). Carotenoid accumulation and function in seeds and non-green tissues. *Plant, Cell Environ.* 29, 435–445. doi:10.1111/j.1365-3040.2005.01492.x.
- Huang, L., Zhou, Y., Meng, L., Wu, D., and He, Y. (2017). Comparison of different CCD detectors and chemometrics for predicting total anthocyanin content and antioxidant activity of mulberry fruit using visible and near infrared hyperspectral imaging technique. *Food Chem.* 224, 1–10. doi:10.1016/j.foodchem.2016.12.037.
- Huang, M., Wang, Q. G., Zhu, Q. B., Qin, J. W., and Huang, G. (2015). Review of seed quality and safety tests using optical sensing technologies. *Seed Sci. Technol.* 43, 337–366.
- Jaillais, B., Perrin, E., Mangavel, C., and Bertrand, D. (2011). Characterization of the desiccation of wheat kernels by multivariate imaging. *Planta* 233, 1147–1156. doi:10.1007/s00425-011-1369-0.
- Jaillais, B., Roumet, P., Pinson-Gadais, L., and Bertrand, D. (2015). Detection of *Fusarium* head blight contamination in wheat kernels by multivariate imaging. *Food Control* 54, 250–258. doi:10.1016/j.foodcont.2015.01.048.
- Jalink, H., Frandas, A., van der Schoor, R., and Bino, R. J. (1998a). Chlorophyll fluorescence of the testa of *Brassica oleracea* seeds as an indicator of seed maturity and seed quality. *Sci. Agric.* 55, 88–93. doi:10.1590/S0103-90161998000500016.
- Jalink, H., van der Schoor, R., Birnbaum, Y. E., and Bino, R. J. (1999). Seed chlorophyll content as an indicator for seed maturity and seed quality. *Acta Hort.* 504, 219–228.
- Jalink, H., Van der Schoor, R., Frandas, A., Van Pijlen, J. G., and Bino, R. J. (1998b). Chlorophyll fluorescence of *Brassica oleracea* seeds as a non-destructive marker for seed maturity and seed performance. *Seed Sci. Res.* 8, 437–443. doi:10.1017/s0960258500004402.
- Jang, S., Dilger, R. N., and Johnson, R. W. (2010). Luteolin inhibits microglia and alters hippocampal-dependent spatial working memory in aged mice. *J. Nutr.* 140, 1892–1898.

- doi:10.3945/jn.110.123273.
- Jianhua, Z., and McDonald, M. B. (1996). The saturated salt accelerated aging test for small-seeded crops. *Seed Sci. Technol.* 25, 123–131.
- Jones, M. A. (2018). Using light to improve commercial value. *Hortic. Res.* 5, 47. doi:10.1038/s41438-018-0049-7.
- Jue, T., and Masuda, K. eds. (2013). *Application of Near Infrared Spectroscopy in Biomedicine - Volume 4*. Springer US doi:10.1007/978-1-4614-6252-1.
- Kassambara, A., and Mundt, F. (2019). Factoextra: Extract and visualize the results of multivariate data analyses. Available at: <https://cran.r-project.org/package=factoextra>.
- Kenanoglu, B. B., Demir, I., and Jalink, H. (2013). Chlorophyll fluorescence sorting method to improve quality of *Capsicum* pepper seed lots produced from different maturity fruits. *HortScience* 48, 965–968. doi:10.21273/hortsci.48.8.965.
- Kircher, S., and Schopfer, P. (2012). Photosynthetic sucrose acts as cotyledon-derived long-distance signal to control root growth during early seedling development in *Arabidopsis*. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 109, 11217–11221. doi:10.1073/pnas.1203746109.
- Konstantinova, P., van der Schoor, R., van den Bulk, R., and Jalink, H. (2002). Chlorophyll fluorescence sorting as a method for improvement of barley (*Hordeum vulgare* L.) seed health and germination. *Seed Sci. Technol.* 30, 411–421.
- Kotwaliwale, N., Singh, K., Kalne, A., Jha, S. N., Seth, N., and Kar, A. (2014). X-ray imaging methods for internal quality evaluation of agricultural produce. *J. Food Sci. Technol.* 51, 1–15. doi:10.1007/s13197-011-0485-y.
- Kumar, Y., and Chandrakant Karne, S. (2017). Spectral analysis: A rapid tool for species detection in meat products. *Trends Food Sci. Technol.* 62, 59–67. doi:10.1016/j.tifs.2017.02.008.
- Li, Z., Wu, S., Chen, J., Wang, X., Gao, J., Ren, G., et al. (2017). NYEs/SGRs-mediated chlorophyll degradation is critical for detoxification during seed maturation in *Arabidopsis*. *Plant J.* 92, 650–661.
- Liaw, A., and Wiener, M. (2002). Classification and Regression by RandomForest. *R News*, 18–22. Available at: <https://cran.r-project.org/doc/Rnews/> [Accessed July 12, 2020].
- Liu, C., Liu, W., Lu, X., Chen, W., Yang, J., and Zheng, L. (2014). Nondestructive determination of transgenic *Bacillus thuringiensis* rice seeds (*Oryza sativa* L.) using multispectral imaging and chemometric methods. *Food Chem.* 153, 87–93.
- Liu, C., Liu, W., Lu, X., Chen, W., Yang, J., and Zheng, L. (2016). Potential of multispectral imaging for real-time determination of colour change and moisture distribution in carrot

- slices during hot air dehydration. *Food Chem.* 195, 110–116. doi:10.1016/j.foodchem.2015.04.145.
- Maguire, J. D. (1962). Speed of germination - aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Sci.* 2, 176–177.
- Marchi, J. L. de, and Cicero, S. M. (2017). Use of the software Seed Vigor Imaging System (SVIS®) for assessing vigor of carrot seeds. *Sci. Agric.* 74, 469–473.
- Marcos-Filho, J. (2015). *Fisiologia de sementes de plantas cultivadas*. 2nd ed. Londrina: ABRATES.
- Mastrangelo, T., Silva, F. F. da, Mascarin, G. M., and Silva, C. B. da (2019). Multispectral imaging for quality control of laboratory-reared *Anastrepha fraterculus* (Diptera: Tephritidae) pupae. *J. Appl. Entomol.* 143, 1072–1079. doi:10.1111/jen.12716.
- Medeiros, A. D. de, Pinheiro, D. T., Xavier, W. A., Silva, L. J. da, and Dias, D. C. F. dos S. (2020a). Quality classification of *Jatropha curcas* seeds using radiographic images and machine learning. *Ind. Crops Prod.* 146, 112162. doi:10.1016/j.indcrop.2020.112162.
- Medeiros, A. D. de, Zavala-León, M. J., Silva, L. J. da, Oliveira, A. M. S., and Dias, D. C. F. dos S. (2020b). Relationship between internal morphology and physiological quality of pepper seeds during fruit maturation and storage. *Agron. J.* 112, 25–35. doi:10.1002/agj2.20071.
- Miranda, R. M. de (2015). Qualidade fisiológica, anatomia e histoquímica durante o desenvolvimento de sementes de cenoura (*Daucus carota* L.). doi:10.1590/1413-70542017412009216.
- Miranda, R. M. de, Dias, D. C. F. dos S., Picoli, E. A. de T., Silva, P. P. de, and Nascimento, W. M. (2017). Physiological quality, anatomy and histochemistry during the development of carrot seeds (*Daucus carota* L.). *Ciência e Agrotecnologia* 41, 169–180.
- Nakajima, S., Ito, H., Tanaka, R., and Tanaka, A. (2012). Chlorophyll b reductase plays an essential role in maturation and storability of Arabidopsis seeds. *Plant Physiol.* 160, 261–273. doi:10.1104/pp.112.196881.
- Nascimento, W. M. (1991). Efeito da ordem das umbelas na produção e qualidade de sementes de cenoura. *Rev. Bras. Sementes* 13, 131–133. doi:10.17801/0101-3122/rbs.v13n2p131-133.
- Nijënstein, J. H. (2014). Chlorophyll fluorescence as an indicator of seed quality. *ISTA News Bull.* 147, 7–9.
- Olesen, M. H., Carstensen, J. M., and Boelt, B. (2011). Multispectral imaging as a potential tool for seed health testing of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Seed Sci. Technol.* 39, 140–

- 150.
- Olesen, M. H., Nikneshan, P., Shrestha, S., Tadayyon, A., Deleuran, L. C., Boelt, B., et al. (2015). Viability prediction of *Ricinus cummunis* L. seeds using multispectral imaging. *Sensors* 15, 4592–4604.
- Olesen, M. H., Van Duijn, B., and Boelt, B. (2014). Introduction of new methods: spectral imaging. *Seed Test. Int. - ISTA News Bull.*, 10–13.
- Ooms, D., and Destain, M. F. (2011). Evaluation of chicory seeds maturity by chlorophyll fluorescence imaging. *Biosyst. Eng.* 110, 168–177. doi:10.1016/j.biosystemseng.2011.07.012.
- Pádua, G. P. de, Carvalho, M. L. M. de, França-Neto, J. de B., Guerreiro, M. C., and Guimarães, R. M. (2009a). Response of soybean genotypes to the expression of green seed under temperature and water stresses. *Rev. Bras. Sementes* 31, 140–149.
- Pádua, G. P. de, França-Neto, J. D. B., Carvalho, M. L. M. de, Costa, O., Krzyzanowski, F. C., and Costa, N. P. da (2007). Tolerance level of green seed in soybean seed lots after storage. *Rev. Bras. Sementes* 29, 128–138.
- Pádua, G. P. de, França-Neto, J. de B., Carvalho, M. L. M. de, Krzyzanowski, F. C., and Guimarães, R. M. (2009b). Incidence of green soybean seeds as a function of environmental stresses during seed maturation. *Rev. Bras. Sementes* 31, 150–159.
- Panobianco, M., and Filho, J. M. (2001). Envelhecimento acelerado e deterioração controlada em sementes de tomate. *Sci. Agric.* 58, 525–531. doi:10.1590/S0103-90162001000300014.
- Puthur, J. T., and Saradhi, P. P. (2004). Developing embryos of *Sesbania sesban* have unique potential to photosynthesize under high osmotic environment. *J. Plant Physiol.* 161, 1107–1118. doi:10.1016/j.jplph.2004.03.002.
- R Core Team (2019). R Project for Statistical Computing. *R A Lang. Environ. Stat. Comput. Vienna, Austria*. Available at: www.R-project.org [Accessed June 29, 2020].
- Rahman, A., and Cho, B. K. (2016). Assessment of seed quality using non-destructive measurement techniques: A review. *Seed Sci. Res.* 26, 285–305. doi:10.1017/S0960258516000234.
- Ramel, F., Birtic, S., Cuiiné, S., Triantaphylidès, C., Ravanat, J. L., and Havaux, M. (2012). Chemical quenching of singlet oxygen by carotenoids in plants. *Plant Physiol.* 158, 1267–1278. doi:10.1104/pp.111.182394.
- Rodo, A. B., Panobianco, M., and Marcos-Filho, J. (2000). Metodologia alternativa do teste de envelhecimento acelerado para sementes de cenoura. *Sci. Agric.* 57, 289–292.

- Sako, Y., McDonald, M. B., Fujimura, K., Evans, A. F., and Bennett, M. A. (2001). A system for automated seed vigour assessment. *Seed Sci. Technol.* 29, 625–636.
- Salimi, Z., and Boelt, B. (2019a). Classification of processing damage in sugar beet (*Beta vulgaris*) seeds by multispectral image analysis. *Sensors* 19, 2360. doi:10.3390/s19102360.
- Salimi, Z., and Boelt, B. (2019b). Optimization of germination inhibitors elimination from sugar beet (*Beta vulgaris* L.) seeds of different maturity classes. *Agronomy* 9, 763. doi:10.3390/agronomy9110763.
- Sendin, K., Manley, M., and Williams, P. J. (2018). Classification of white maize defects with multispectral imaging. *Food Chem.* 243, 311–318. doi:10.1016/j.foodchem.2017.09.133.
- Shetty, N., Olesen, M. H., Gislum, R., Deleuran, L. C., and Boelt, B. (2012). Use of partial least squares discriminant analysis on visible-near infrared multispectral image data to examine germination ability and germ length in spinach seeds. *J. Chemom.* 26, 462–466.
- Shrestha, S., Deleuran, L. C., Olesen, M. H., and Gislum, R. (2015). Use of multispectral imaging in varietal identification of tomato. *Sensors* 15, 4496–4512.
- Shrestha, S., Deleuran, L., and Gislum, R. (2016). Classification of different tomato seed cultivars by multispectral visible-near infrared spectroscopy and chemometrics. *J. Spectr. Imaging* 5, 1–9. doi:10.1255/jsi.2016.a1.
- Silva, V. N. (2012). Avaliação da qualidade de sementes de tomate e de berinjela por meio de análise de imagens.
- Silva, V. N., and Cicero, S. M. (2014). Avaliação do vigor de sementes de tomate durante o armazenamento por meio de análise computadorizada de imagens de plântulas. *Semin. Ciências Agrárias* 35, 2317–2326. doi:10.5433/1679-0359.2014v35n4Suplp2317.
- Silva, V. N., Cicero, S. M., and Bennett, M. (2013). Associations between X-ray visualised internal tomato seed morphology and germination. *Seed Sci. Technol.* 41, 225–234. doi:10.15258/sst.2013.41.2.05.
- Smolikova, G., Dolgikh, E., Vikhnina, M., Frolov, A., and Medvedev, S. (2017). Genetic and hormonal regulation of chlorophyll degradation during maturation of seeds with green embryos. *Int. J. Mol. Sci.* 18, 1993 (1–15).
- Smolikova, G., Shiroglazova, O., Vinogradova, G., Leppyanen, I., Dinastiya, E., Yakovleva, O., et al. (2020). Comparative analysis of the plastid conversion, photochemical activity and chlorophyll degradation in developing embryos of green-seeded and yellow-seeded pea (*Pisum sativum*) cultivars. *Funct. Plant Biol.* 47, 424. doi:10.1071/FP19270.
- Steckel, J. R. A., Gray, D., and Rowse, H. R. (1989). Relationships between indices of seed

- maturity and carrot seed quality. *Ann. Appl. Biol.* 114, 177–183.
- Stolarczyk, J., and Janick, J. (2011). “Carrot: History and Iconography,” in *Chronica Horticulturae* (International Society for Horticultural Science), 13–18.
- Strasserf, R. J., Srivastava, A., and Govindjee (1995). Polyphasic chlorophyll a fluorescence transient in plants and cyanobacteria. *Photochem. Photobiol.* 61, 32–42. doi:10.1111/j.1751-1097.1995.tb09240.x.
- Suhartanto, M. R. (2002). Chlorophyll in tomato seeds: marker for seed performance?
- Sun, Q., Wang, J. hua, and Sun, B. qi (2007). Advances on seed vigor physiological and genetic mechanisms. *Agric. Sci. China* 6, 1060–1066. doi:10.1016/S1671-2927(07)60147-3.
- Teixeira, R. N., Ligterink, W., França-Neto, J. de B., Hilhorst, H. W. M., and Silva, E. A. A. da (2016). Gene expression profiling of the green seed problem in Soybean. *BMC Plant Biol.* 16, 1–15. doi:10.1186/s12870-016-0729-0.
- Thompson, A. E., and Kleiman, R. (1988). Effect of seed maturity on seed oil, fatty acid and crude protein content of eight *Cuphea* species. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 65, 139–146. doi:10.1007/BF02542566.
- Triantaphylidès, C., and Havaux, M. (2009). Singlet oxygen in plants: production, detoxification and signaling. *Trends Plant Sci.* 14, 219–228. doi:10.1016/j.tplants.2009.01.008.
- Vadivambal, R., and Jayas, D. S. (2015). *Bio-imaging: Principles, Techniques and Applications*. Boca Raton: CRC Press.
- Van der Burg, W. J., Aartse, J. W., Van Zwol, R. A., Jalink, H., and Bino, R. J. (1994). Predicting tomato seedling morphology by X-ray analysis of seeds. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 119, 258–263. doi:10.21273/jashes.119.2.258.
- Venables, W. N., and Ripley, B. D. (2002). *Modern Applied Statistics with S*. 4th ed. New York: Springer-Verlag doi:10.1214/aoms/1177697510.
- Vidyarathi, S. K., and Evans, M. E. (2019). “Development of new tomato products in a very consolidated market,” in *Tomato Chemistry, Industrial Processing and Product Development*, ed. S. Porretta, 139–152. doi:https://doi.org/10.1039/9781788016247.
- Vigeolas, H., Van Dongen, J. T., Waldeck, P., Hühn, D., and Geigenberger, P. (2003). Lipid storage metabolism is limited by the prevailing low oxygen concentrations within developing seeds of oilseed rape. *Plant Physiol.* 133, 2048–2060. doi:10.1104/pp.103.031963.
- Vrešak, M., Olesen, M. H., Gislum, R., Bavec, F., and Jørgensen, J. R. (2016). The use of image-spectroscopy technology as a diagnostic method for seed health testing and variety

- identification. *PLoS One* 11, e0152011. doi:10.1371/journal.pone.0152011.
- Wang, Y., Jie, W., Peng, X., Hua, X., Yan, X., Zhou, Z., et al. (2019). Physiological adaptive strategies of oil seed crop *Ricinus communis* early seedlings (cotyledon vs. true leaf) under salt and alkali stresses: From the growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence. *Front. Plant Sci.* 9, 1–13. doi:10.3389/fpls.2018.01939.
- Weber, H., Borisjuk, L., and Wobus, U. (2005). Molecular physiology of legume seed development. *Annu. Rev. Plant Biol.* 56, 253–279. doi:10.1146/annurev.arplant.56.032604.144201.
- Wickham, H. (2007). Reshaping Data with the reshape Package. *J. Stat. Softw.* 21, 1–20. doi:10.18637/jss.v021.i12.
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. 2nd ed. Springer Nature doi:10.1007/978-0-387-98141-3.
- Wilkes, T., Nixon, G., Bushell, C., Waltho, A., Alroichdi, A., and Burns, M. (2016). Feasibility study for applying spectral imaging for wheat grain authenticity testing in pasta. *Food Nutr. Sci.* 7, 355–361. doi:10.4236/fns.2016.75037.
- Wu, D., He, Y., and Feng, S. (2008). Short-wave near-infrared spectroscopy analysis of major compounds in milk powder and wavelength assignment. *Anal. Chim. Acta* 610, 232–242. doi:10.1016/j.aca.2008.01.056.
- Wu, D., and Sun, D. W. (2013). Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review - Part II: Applications. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 19, 15–28. doi:10.1016/j.ifset.2013.04.016.
- Xia, Y., Xu, Y., Li, J., Zhang, C., and Fan, S. (2019). Recent advances in emerging techniques for non-destructive detection of seed viability: A review. *Artif. Intell. Agric.* 1, 35–47. doi:10.1016/j.aiia.2019.05.001.
- Xing, J., and De Baerdemaeker, J. (2005). Bruise detection on “Jonagold” apples using hyperspectral imaging. *Postharvest Biol. Technol.* 37, 152–162. doi:10.1016/j.postharvbio.2005.02.015.
- Zhang, H., Zhou, D., Matthew, C., Wang, P., and Zheng, W. (2008). Photosynthetic contribution of cotyledons to early seedling development in *Cynoglossum divaricatum* and *Amaranthus retroflexus*. *New Zeal. J. Bot.* 46, 39–48. doi:10.1080/00288250809509752.
- Zheng, W., Wang, P., Zhang, H., and Zhou, D. (2011). Photosynthetic characteristics of the cotyledon and first true leaf of castor (*Ricinus communis* L.). *Aust. J. Crop Sci.* 5, 702–708.
- Zorato, M. de F., Peske, S. T., Takeda, C., and França Neto, J. D. B. (2007). Sementes

esverdeadas em soja: testes alternativos para determinar a sua qualidade. *Rev. Bras. Sementes* 29, 1–10. doi:10.1590/s0101-31222007000100001.