

# RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo será disponibilizado somente a partir de 19/09/2027

At the author's request, the full text will not be available online until September 19, 2027

**BRUNNA RITHIELLY REZENDE**

**PREDIÇÃO DA QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE SOJA USANDO  
APRENDIZADO DE MÁQUINA**

**Botucatu**

**2025**



**BRUNNA RITHIELLY REZENDE**

**PREDIÇÃO DA QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE SOJA USANDO  
APRENDIZADO DE MÁQUINA**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Agricultura).

Orientadora: Prof. Dra. Maria Márcia Pereira Sartori

Coorientador: Prof. Dr. Anderson Rodrigo da Silva

**Botucatu**

**2025**

R467p

Rezende, Brunna Rithielly

Predição da qualidade fisiológica de sementes de soja usando aprendizado de máquina / Brunna Rithielly Rezende. -- Botucatu, 2025

85 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu

Orientadora: Maria Márcia Pereira Sartori

Coorientador: Anderson Rodrigo da Silva

1. Predição. 2. Germinação. 3. Vigor. 4. Longevidade. 5. Aprendizado de máquina. I. Título.

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO



Título:

PREDIÇÃO DA QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE SOJA USANDO  
APRENDIZADO DE MÁQUINA

AUTORA: BRUNNA RITHIELLY REZENDE

ORIENTADORA: MARIA MÁRCIA PEREIRA SARTORI

COORDENADOR: ANDERSON RODRIGO DA SILVA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia  
(Agricultura), pela Comissão Examinadora:  
Pesquisadora Dr.<sup>a</sup> MARIA MÁRCIA PEREIRA SARTORI (Participação Presencial)  
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu UNESP  
Prof. Dr. RENATO FERNANDES CANTÃO (Participação Virtual)  
Física, Química e Matemática / Universidade Federal de São Carlos  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> AMANDA RITHIELI PEREIRA DOS SANTOS (Participação Virtual)  
Instituto Federal Goiano, campus Urutai  
Prof. Dr. EDVALDO APARECIDO AMARAL DA SILVA (Participação Presencial)  
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> ADELAIDE DE FÁTIMA BAPTISTA VALENTE FREITAS (Participação Virtual)  
Matemática / Universidade de Aveiro

Botucatu, 19 de setembro de 2025.



*Aos meus amados avós,  
Joana Darc e Mário, e à minha amada mãe  
Telma, cujo apoio, força e inspiração foram  
importantíssimos em cada passo desta jornada, dedico*



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me guiar em todos os momentos, por me dar força nas dificuldades, pelas infinitas graças recebidas e por sempre ser o meu maior suporte.

A minha mãe Telma, por todo o amor incondicional, apoio, por me motivar e acreditar em mim mesmo quando nem eu acreditava. Obrigada por tudo mami, essa conquista é nossa. Também agradeço a toda minha família, em especial aos meus queridos avós Mario e Joana, por todo o apoio.

À Profa. Dra. Maria Márcia Pereira Sartori, pela orientação, ensinamentos e paciência. A professora tornou a caminhada mais leve e, nos momentos difíceis, conduziu tudo com empatia e sabedoria. Vivemos muitos momentos divertidos, de confraternização e cantorias no karaokê com o grupo em sua casa. Gratidão por tudo, professora, obrigada também pela sua amizade.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Anderson Rodrigo da Silva, pela orientação e valiosa contribuição neste trabalho. O Prof. Anderson foi um dos meus maiores incentivadores a seguir na pós-graduação. Sou extremamente grata pelos ensinamentos, apoio, e por acreditar em mim.

Ao Prof. Dr. Edvaldo Aparecido Amaral da Silva, pelos ensinamentos, orientação, apoio e acolhimento no laboratório. O Prof. Amaral fala sobre sementes com tanta paixão e entusiasmo, sempre cheio de ideias e inovações, que quem tem a honra de ouvi-lo acaba se apaixonando ainda mais pelo assunto.

Ao grupo de pesquisa Modelagem e Estatística Aplicada a Ciências Agrárias (ModelStat), em especial à Gabriela, Amanda Rithieli, Felipe, Renata, Michelane e Mónica, por toda ajuda, apoio, amizade, confraternizações e tardes de café. Obrigada também pela companhia nas datas comemorativas e nos domingos saudosos, quando a falta da família apertava. Vocês, sem dúvida, tornaram a caminhada mais leve. Levarei todos em minhas memórias e no coração. Mas deixo aqui um agradecimento especial à Michelane e à Mónica. Meninas, vocês são irmãs que a vida me deu. A sintonia, companheirismo e a amizade que construímos é raridade. Amo vocês.

Agradeço ao meu amigo Gustavo Roberto, conhecido também por Matias, por todo apoio, amizade, pelas infinitas reuniões e paciência. Obrigada pelos ensinamentos e por me ajudar a dar forma à história do meu trabalho. Estendo também o meu

agradecimento à Thaís, minha companheira de maratonas noturnas de doramas, obrigada pelos momentos divertidos.

A todos do Laboratório de Sementes, Tamires, Dennis, Ana, Matias, Taíse, Vitor e à técnica Valéria Giandoni, meus sinceros agradecimentos por todos os bons momentos, pelas risadas e apoio ao longo dessa jornada. Em especial, à Val e à Tamires, levarei vocês comigo onde eu for. Saibam que foram essenciais para mim nesta reta final. Nos momentos difíceis, me ajudaram a me reerguer e seguir em frente. Obrigada por tudo! Palavras não são suficientes para expressar minha gratidão e carinho.

As amizades construídas durante a pós-graduação, em especial às minhas amigas Bruna dos Anjos, Laryssa Bernardes e Fernanda Marcolan, o meu muito obrigada. Cada uma de vocês teve um papel importante na minha caminhada. Obrigada pelo companheirismo, pelo apoio, pelas risadas e por tornarem o fardo mais leve.

Não poderia deixar de mencionar meus amigos Antônio Arcanjo, Amanda Letícia, Daianny, Juliana e Nelyvania. O apoio de vocês ao longo desses anos foi essencial e fez toda a diferença.

A Dra. Samara Moreira Perissato, ex-colega de laboratório, pela amizade, troca de ideias e por gentilmente ceder dados que enriqueceram meu banco de dados para este trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol, pela disponibilização de vários lotes de sementes que contribuíram para o desenvolvimento dessa pesquisa.

A todos os professores, técnicos e funcionários do Departamento de Produção Vegetal da Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP/Botucatu. Em especial, ao Prof. Dr. João Nakagawa, pelos ensinamentos e conversas. Foi uma honra conhecê-lo e fazer parte do laboratório. Também ao Prof. Dr. João Paulo Ribeiro-Oliveira, pelas conversas e esclarecimentos das minhas dúvidas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – (CAPES), Código de financiamento 001, pela concessão da bolsa de estudos.

Minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuiriam para minha formação pessoal e profissional.

“O medo de sofrer é pior do que o próprio sofrimento. E que nenhum coração jamais sofreu quando foi em busca de seus sonhos”.



## RESUMO

Para o sucesso do estande e a obtenção de altas produtividades, é imprescindível o uso de sementes de boa qualidade. A qualidade fisiológica compreende o potencial das sementes em originarem plântulas normais (germinação), a velocidade de emergência (vigor) e a capacidade de armazenamento (longevidade). A germinação, sob o ponto de vista da tecnologia de sementes, refere-se à formação de uma plântula normal. O vigor abrange características associadas à uniformidade, velocidade de germinação e tolerância a condições ambientais adversas. Já a longevidade é definida como a capacidade da semente em manter sua viabilidade ao longo do tempo. A determinação do potencial fisiológico de um lote é tradicionalmente feita através do teste de germinação e de testes de vigor, como envelhecimento acelerado e condutividade elétrica, no caso da soja. A avaliação da longevidade, por sua vez, geralmente não é realizada pela indústria, pois requer tempo e infraestrutura específica. No Capítulo 1, o objetivo foi prever a longevidade de sementes de soja (p50) utilizando modelos de aprendizado de máquina (ML), com base em atributos de qualidade fisiológica, componentes de produção e variáveis climáticas. As sementes foram obtidas em dois ambientes tropicais de produção. Foram avaliadas 22 variáveis, que, após diagnóstico de multicolinearidade, foram reduzidas para 13 (VIFs < 6; número de condição = 6,78). A base de dados foi composta por 296 observações, divididas em 70% para treino e 30% para teste. Quatro algoritmos foram utilizados: Regressão Linear (RL), Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF) e Redes Neurais Artificiais (ANN), todos validados por amostragem cruzada (5 vezes). Os modelos RF e ANN apresentaram os melhores desempenhos. O RF obteve os menores erros, com RMSE de 9,11 dias e  $R^2 = 0,88$ , seguida pela ANN, com RMSE de 10,16 dias e  $R^2 = 0,86$ . As variáveis mais importantes para a predição foram temperatura mínima, precipitação e temperatura máxima. Os resultados demonstraram o potencial de uso de ML para a predição da longevidade, permitindo decisões mais eficientes no armazenamento e escoamento de lotes na indústria, além de auxiliar na gestão de bancos de germoplasma. No Capítulo 2, avaliou-se o desempenho de sementes de soja aplicando modelos de ML para a predição da germinação e classificação do vigor. Para a predição da germinação, foram avaliados os algoritmos RF, SVM, ANN e Gaussian Process Regression (GPR); para a classificação do vigor, foram usados Análise Discriminante Linear (LDA), Análise

Discriminante Quadrática (QDA), SVM e RF. A Random Forest apresentou o melhor desempenho em ambas as tarefas, com predição de germinação com RMSE abaixo de 13% e classificação de vigor com acurácia de 99% nas fases de treinamento e teste. Fatores climáticos e de produção influenciaram a germinação, enquanto variáveis fisiológicas, como primeira contagem, plântulas anormais e comprimento de raiz, foram determinantes para o vigor. Conclui-se que modelos de ML, baseado em dados simples de campo e laboratório, são estratégias rápidas, precisas e eficazes para avaliação do desempenho fisiológico das sementes, com grande potencial de aplicação no controle de qualidade das empresas, especialmente em situações com acesso limitado a tecnologias multiespectrais.

**Palavras-chave:** soja; predição da longevidade (p50); aprendizado de máquina; predição da germinação; classificação de vigor.

## ABSTRACT

For successful crop establishment and high yields, the use of high-quality seeds is essential. Physiological seed quality encompasses the potential of seeds to produce normal seedlings (germination), the speed of emergence (vigor), and storage potential (longevity). From a seed technology perspective, germination refers to the formation of a normal seedling. Vigor includes traits related to uniformity, germination speed, and tolerance to adverse environmental conditions. Longevity, in turn, is defined as the seed's ability to maintain viability over time. The physiological potential of a seed lot is traditionally assessed through germination and vigor tests, such as accelerated aging and electrical conductivity, especially in soybean. However, longevity assessment is rarely performed by the seed industry, as it requires time and specific infrastructure. In Chapter 1, the objective was to predict soybean seed longevity (p50) using machine learning (ML) models, based on physiological quality traits, production components, and climatic variables. Seeds were obtained from two tropical production environments. A total of 22 variables were initially evaluated, which were reduced to 13 after multicollinearity diagnostics (VIFs < 6; condition number = 6.78). The dataset was composed of 296 observations, split into 70% for training and 30% for testing. Four algorithms were used: Linear Regression (LR), Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF), and Artificial Neural Networks (ANN), all validated using 5-fold cross-validation. RF and ANN models showed the best performance. RF presented the lowest prediction errors, with RMSE of 9.11 days and  $R^2 = 0.88$ , followed by ANN with RMSE of 10.16 days and  $R^2 = 0.86$ . The most important variables for longevity prediction were minimum temperature, precipitation, and maximum temperature. These results demonstrate the potential of ML models for predicting seed longevity, enabling more efficient decision-making for storage and seed lot distribution, and assisting in germplasm bank management. In Chapter 2, the performance of soybean seeds was evaluated by applying ML models for germination prediction and vigor classification. For germination prediction, the algorithms RF, SVM, ANN, and Gaussian Process Regression (GPR) were assessed; for vigor classification, Linear Discriminant Analysis (LDA), Quadratic Discriminant Analysis (QDA), SVM, and RF were used. Random Forest showed the best performance in both tasks, with germination prediction RMSE below 13%, and vigor classification accuracy of 99% in both training and testing phases. Climatic and production factors influenced germination, while

physiological variables such as first count, abnormal seedlings, and root length were decisive for vigor. It is concluded that ML models based on simple field and laboratory data are fast, accurate, and effective strategies for evaluating the physiological performance of seeds, with great application potential in quality control routines, especially in contexts with limited access to multispectral technologies.

**Keywords:** soybean; seed longevity prediction (p50); machine learning; germination prediction; vigor classification.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO 1 – DOS DADOS À VIDA DE ARMAZENAMENTO: EXPLORANDO FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA PREDIÇÃO DA LONGEVIDADE DE SEMENTES DE SOJA.....</b>	<b>22</b>
1.1 INTRODUÇÃO.....	24
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
1.3 RESULTADOS.....	31
1.4 DISCUSSÃO.....	39
1.5 CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS .....	44
<b>CAPÍTULO 2 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO FISIOLÓGICO DE LOTES DE SEMENTES DE SOJA: PREDIÇÃO DA GERMINAÇÃO E VIGOR.....</b>	<b>49</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	53
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	54
2.3 RESULTADOS.....	60
2.4 DISCUSSÃO.....	72
2.5 CONCLUSÃO.....	76
REFERÊNCIAS .....	77
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>



## INTRODUÇÃO GERAL

A semente exerce um papel crucial na veiculação de todos os avanços do melhoramento genético, levando ao campo as características genéticas determinantes para o desempenho do cultivar. Sincronicamente, ela é responsável pelo estabelecimento bem-sucedido de um estande adequado, sendo o insumo principal para atingir altas produtividades (Betty et al., 2000; Marcos-Filho, 2015). Dessa forma, a semente assume um papel simbólico, representando tanto a continuidade quanto a diversidade. À medida que os métodos de melhoramento genético são aprimorados, proporcionando resultados cada vez mais surpreendentes, aumenta a demanda por produção de sementes com alto desempenho e atributos aprimorados, tanto para o cultivo em condições de campo quanto para o armazenamento (Marcos-Filho, 2015).

As sementes não se limitam somente ao papel de veículo de tecnologia ou propagação de espécie, mas se tornaram parte integrante da vida diária dos seres humanos, fornecendo nutrição (cereais e leguminosas), óleo, ingredientes para bebidas (café, trigo, soja) e especiarias (pimenta-do-reino) (Rehmani et al., 2023). A soja (*Glycine max* (L.) Merrill), por sua vez, é uma das culturas mais importantes do mundo, com grande impacto nas economias globais (Xavier e Reis, 2022). O Brasil atualmente lidera o posto de maior produtor de soja do mundo, com uma produção de 154 milhões de toneladas, seguido pelos países dos Estados Unidos com 113 milhões de toneladas e da Argentina com 50 milhões de toneladas (USDA, 2024).

A soja não se destaca apenas pelo seu valor comercial, mas também pelo papel essencial na alimentação humana e animal, na indústria e na economia global. Diante dessa relevância, é imprescindível o investimento em tecnologias e práticas que assegurem a qualidade de sementes. A tecnologia de produção de sementes visa elevar a produtividade agrícola, uma vez que a tecnologia e os insumos utilizados permitem a manifestação dos potenciais fisiológicos e genéticos dos cultivares. Portanto, para manter e elevar a produtividade, é fundamental a utilização de sementes de alta qualidade. Assim, compreende-se que a qualidade de sementes é a combinação dos atributos genéticos, físicos, sanitários e fisiológicos (Popinigis, 1985).

Os quatro atributos de qualidade têm importância equivalente, mas nos últimos anos, houve um aumento significativo no interesse pelo potencial fisiológico das sementes na pesquisa, uma vez que compreende o metabolismo da semente em

desempenhar suas funções vitais, envolvendo a germinação (viabilidade), vigor e longevidade (Popinigis, 1985; Bewley et al., 2013).

O potencial fisiológico é compreendido como um conjunto de habilidades que possibilita estimar a capacidade teórica ou a possibilidade de sucesso da semente expressar suas funções vitais sob diferentes condições ambientais (Krzyzanowski et al., 2020). Assim sendo, o potencial de desempenho de um lote de sementes deve abranger a capacidade das sementes originarem plântulas normais, a velocidade de emergência e o potencial de armazenamento (Hampton; Tekrony, 1995).

A germinação pode ser entendida a partir de três pontos de vista: fisiológica (*strictu sensu*) em que ocorre a protrusão da radícula >2mm, do ponto de vista da tecnologia de sementes, o que compreende a capacidade de formação de uma plântula normal com todas as estruturas essenciais, como hipocótilo, epicótilo, cotilédones, raiz primária, raiz secundária e plúmula (BRASIL, 2009), e por último do ponto de vista do produtor, que é a emergência da plântula no solo.

A definição de vigor pela International Seed Testing Association – ISTA (2015), é o potencial máximo de desempenho e atividade da semente durante a germinação ou emergência de plântulas, sob ampla variação de condições do ambiente. Ou seja, o vigor abrange várias características associadas ao comportamento das sementes, como uniformidade e velocidade de germinação, crescimento de plântulas, emergência em campo, tolerância a condições ambientais adversas e capacidade de manter a viabilidade durante o armazenamento (Finch-Savage; Bassel, 2016).

Já a longevidade representa o período máximo em que as sementes se mantêm viáveis sob condições ideais de armazenamento para cada espécie (Hay et al., 2019; Santos, et al., 2019). A longevidade das sementes desempenha um papel importante não apenas na preservação das espécies, mas na garantia do valor do plantio nas próximas safras.

Vale destacar que a perda de vigor das sementes está associada aos processos de deterioração, que resultam da redução das atividades respiratórias e biossintéticas devido a degradação das membranas celulares (Delouche; Baskin, 1973). A rápida redução da longevidade e do vigor das sementes acarretam várias consequências, como a diminuição das taxas de germinação, redução do estabelecimento de plântulas e até mesmo a falha completa da germinação (Wei et al., 2020; Rehmani et al., 2023).

Dessa forma, para determinar o alto potencial fisiológico de um lote de sementes, é necessário a avaliação da germinabilidade e vigor, para assim identificar quais lotes possuem maiores chances de apresentar alto desempenho em campo ou durante o armazenamento. Por isso, são realizadas avaliações em laboratórios, seguindo padrões oficiais, empregando testes de germinação e/ou tetrazólio (viabilidade e vitalidade).

O teste de germinação visa avaliar a qualidade do lote de sementes e determinar o seu valor para semeadura, em combinação com outros parâmetros da análise de sementes (BRASIL, 2009). Além de ser um teste de base confiável para aprimorar o comércio de sementes viáveis, ele tem permitido atingir níveis confiáveis e aceitáveis de reprodutibilidade (Silva, 2006; Marcos Filho, 2015).

São vários os testes para avaliação de vigor, sendo categorizados em testes físicos, fisiológicos, bioquímicos e testes de resistência a estresse. Para a avaliação do vigor em sementes de soja, o recomendado são os dois principais testes de vigor, o teste de envelhecimento acelerado e o da condutividade elétrica (ISTA, 2015). Além desses testes recomendados, avaliações fisiológicas relacionados à germinação, como primeira contagem e desempenho de plântulas, como crescimento e massa seca de plântulas também são usuais (Ding et al., 2025).

Para avaliar a longevidade, estuda-se a perda da viabilidade durante o armazenamento, como proposto por Roberts em 1972 que reconheceu que a perda da viabilidade segue um padrão sigmoide, relacionado à distribuição normal de vida entre as sementes de uma população. O modelo de longevidade que descreve essas relações são as equações de viabilidade, que são ajustes de distribuições normais cumulativas negativas à proporção de sementes viáveis em amostras de sementes armazenadas em diferentes condições de umidade e temperatura constante.

Nessa avaliação é realizado teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de sal com ampla faixa de temperatura e combinações de umidade relativa. No entanto, avaliar a longevidade em escala experimentalmente viável requer alterar umas das condições de armazenamento, como teor de água da semente, ou a umidade relativa em que as sementes foram equilibradas, ou a temperatura ou a disponibilidade de oxigênio (Hay et al., 2018).

A indústria de sementes, de modo geral, adota testes padronizados de germinação e vigor para prever o desempenho dos lotes no campo. No entanto, o teste de longevidade ainda não faz parte da rotina laboratorial das empresas do setor.

necessitam de ferramentas específicas para extração de informações estratégicas de forma rápida e precisa (Batista et al., 2022; Petronilio et al., 2025). Neste contexto, os insights deste trabalho podem apoiar a tomada de decisão já na fase de campo, ao permitir a predição da germinação das sementes com o modelo RF a partir de variáveis climáticas e fitotécnicas de produção das plantas, com erro de predição da ordem de 12,87% e  $R^2_{aj}$  de 0,67. Após a colheita, ressaltamos ainda que o outro modelo de RF desenvolvido possibilita a determinação do vigor das sementes, permitindo determinar o potencial fisiológico e o desempenho dos lotes com 99% de acurácia e ausência total de erros. Assim, a técnica proposta contribui na tomada de decisão autônoma e gestão mais eficiente tanto do campo de produção quanto do controle de qualidade de sementes armazenadas. Essa automação otimiza processos, reduzindo custos e tempo, além de minimizar erros de testes que muitas vezes são subjetivos conforme têm sido documentados em diversas culturas agrícolas e florestais (Barboza da Silva et al., 2021; Bianchini et al., 2021; Fonseca de Oliveira et al., 2022; Medeiros et al., 2020).

## **2.5 CONCLUSÃO**

Aqui, apresentamos estratégias inéditas de predição autônoma do desempenho de lotes de sementes de soja a partir de dados rotineiros obtidos em avaliações de campo e laboratório. A abordagem utilizada tem utilidade prática e promissora na indústria de sementes ao propor modelos de aprendizado de máquina como ferramenta auxiliar na gestão da qualidade fisiológica dos lotes. O modelo RF apresentou o melhor desempenho na predição da germinação, com erro de 12,87%, enquanto na classificação do vigor, alcançou 99% de acurácia, sem erros de classificação. Esses resultados permitem a aplicação da técnica, reforçando o potencial do aprendizado de máquina como uma ferramenta na gestão da qualidade fisiológica das sementes.

## REFERÊNCIAS

- ABDULKHANI, A.; ALIZADEH, P.; HEDJAZI, S.; HAMZEH, Y. Potential of Soya as a raw material for a whole crop biorefinery. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 75, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.082>.
- BARBOZA DA SILVA, C., BIANCHINI, V. DE J.M., MEDEIROS, A.D. DE, MORAES, M.H.D. DE, MARASSI, A.G., TANNÚS, A. A novel approach for *Jatropha curcas* seed health analysis based on multispectral and resonance imaging techniques. **Ind. Crops Prod.** 161, 113186, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113186>
- BARBOZA DA SILVA, C.; OLIVEIRA, N. M.; CARVALHO, M. E. A.; MEDEIROS, A. D.; NOGUEIRA, M. L.; DOS REIS, A. R. Autofluorescence-spectral imaging as an innovative method for rapid, non-destructive and reliable assessing of soybean seed quality. **Scientific Reports**, 11, 17834, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97223-5>
- BATISTA, T. B.; MASTRANGELO, C. B.; MEDEIROS, A. D.; PETRONILIO, A. C. P.; FONSECA DE OLIVEIRA, G. R.; SANTOS, I. L.; CRUSCIOL, C. A. C.; AMARAL DA SILVA, E. A. A Reliable Method to Recognize Soybean Seed Maturation Stages Based on Autofluorescence-Spectral Imaging Combined With Machine Learning Algorithms. **Frontiers Plant Science**, v. 13, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.914287>
- BEWLEY, J. D.; BRADFORD, K. J.; HILHORST, H. W. M.; NONOGAKI, H. “**Seeds,**” in **Physiology of Development, Germination and Dormancy.**, 3rd ed, Springer, New York, 2013. doi: 10.1007/978-1-4614-4693-4
- BIANCHINI, V. DE J.M., MASCARIN, G.M., SILVA, L.C.A.S., ARTHUR, V., CARSTENSEN, J.M., BOELT, B., BARBOZA DA SILVA, C. Multispectral and X-ray images for characterization of *Jatropha curcas* L. seed quality. **Plant Methods**, 17, 1–13, 2021. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00709-6>
- BRASIL. **Lei nº10.711, de 5 de agosto de 2003.** Dispõe sobre o Sistema Nacional de Sementes e Mudanças e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2003. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2003/l10.711.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/l10.711.htm). Acesso em: 28 mai.2025.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras Para Análise de Sementes.** Brasília, DF, 395 p. 2009. ISBN 978-85-99851-70-8
- BRUNEL-MUGUET, S., BARÁNEK, M., FRAGKOSTEFANAKIS, S., SAUVAGE, C., LIEBERMAN-LAZAROVICH, M., MAURY, S., KAISERLI, E., SEGAL, N., TESTILLANO, P.S., VERDIER, J. Maternal environmental effects and climate-smart seeds: unlocking epigenetic inheritance for crop innovation in the seed industry. **Plant J.**, 123, 1–14, 2025. <https://doi.org/10.1111/tpj.70407>
- CHENG, H.; YE, M.; WU, T.; MA, H. Evaluation and Heritability Analysis of the Seed Vigor of Soybean Strains Tested in the Huanghuaihai Regional Test of China. **Plants**, v. 12, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12061347>

COPELAND, L. O.; MCDONALD, M. B. **Principles of seed science and technology**. 4th edn. Springer, Boston, MA, 2001. p. 390

CÓRDOBA FIGUEROA, M. E.; FERREIRA, D. S.; REZENDE, B. R.; BATISTA, T. B.; PEREIRA-FILHO, E. R.; SARTORI, M. M. P.; AMARAL DA SILVA, E. A. Laser induced-breakdown spectroscopy (LIBS) combined with machine learning algorithms: An accurate tool to identify primed seeds. **Microchemical Journal**, v. 214, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.113933>.

DEVI, P., AWASTHI, R., JHA, U., SHARMA, K.D., PRASAD, P.V.V., SIDDIQUE, K.H.M., ROORKIWAL, M., NAYYAR, H. Understanding the effect of heat stress during seed filling on nutritional composition and seed yield in chickpea (*Cicer arietinum* L.). **Sci. Rep.**, 13, 1–15, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-02342586-0>

DING, W.; LIN, J.; LI, C.; ZHU, Z.; WU, C.; CAO, J.; LIU, D.; ZHANG, Y.; YANG, Q.; XING, A.; YAO, S.; SUN, Y.; GUO, N.; XING, H.; ZHAO, J. Development of a comprehensive evaluation system and models to determine soybean seed vigor. **Industrial Crops and Products**. v. 224, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120329>.

EBONE, L. A.; CAVERZAN, A.; TAGLIARI, A.; CHIOMENTO, J. L. T.; SILVEIRA, D. C.; CHAVARRIA, G. Soybean seed vigor: uniformity and growth as key factors to improve yield. **Agronomy**, 10, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040545>

EGLI, D. B.; TEKRONY, D. M.; HEITHOLT, J. J.; RUPE, J. Air temperature during seed filling and soybean seed germination and vigor. **Crop Science**, v. 45, p.1329–1335, 2005.

FINCH-SAVAGE, W. E.; BASSEL, G. W. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 3, 2016. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>

FONSECA DE OLIVEIRA, G. R., MASTRANGELO, C. B., HIRAI, W. Y., BATISTA, T. B., SUDKI, J. M., PETRONILIO, A. C. P., CRUSCIOL, C. A. C., AMARAL DA SILVA, E. A. An Approach Using Emerging Optical Technologies and Artificial Intelligence Brings New Markers to Evaluate Peanut Seed Quality. **Frontiers Plant Science**, 13:849986, 2022. doi: 10.3389/fpls.2022.849986

GREENACRE, M.; GROENEN, P.J.F.; HASTIE, T.; DENZA, A. I.; MARKOS, A.; TUZHILINA, E. Publisher correction: principal component analysis. **Nature Reviews Methods Primers**, 3, n. 1, 2023. <https://doi.org/10.1038/s43586-02200184-w>

HUSSAIN, L.; AJAZ, R. Seed classification using Machine Learning techniques. **Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology**, v. 2, 1098–1102, 2015.

ISTA, International rules for seed testing, International Seed Testing Association, Basserdorf, Switzerland, 2015.

ISTA. International Rules for Seed Analysis. International Rules for Seed Testing. Bassersdorf: Zürischstr, 2020.

KRZYŻANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. B.; GOMES-JUNIOR, F. G.; NAKAGAWA, J. Teste de vigor baseados em desempenho de plântulas. *In*: KRZYŻANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA-NETO, J. B.; MARCOS-FILHO, J. **Vigor de Sementes: Conceitos e Testes**. Londrina: Associação Brasileira de Tecnologia de Sementes (ABRATES), 2020. cap. 3, p. 79-140. ISBN: 9786599200007

KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; NETER, J. **Applied Linear Regression Models**. 4th ed., McGraw-Hill Irwin, 2004. ISBN-10. 0072386916 · ISBN-13. 978-0072386912

LIU, Y.; HEUVELINK, G. B. M.; BAI, Z.; HE, P.; XU, X.; DING, W.; HUANG, S. Analysis of spatio-temporal variation of crop yield in China using stepwise multiple linear regression. **Field Crops Research**, v. 264, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108098>

MEDEIROS, A. D.; CAPOBIANGO, N. P.; DA SILVA, J. M.; DA SILVA, L. J.; DA SILVA, C. B.; DIAS, D. C. F. S. Interactive machine learning for soybean seed and seedling quality classification. **Scientific Reports**, v. 10, n. 11267, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68273-y>

MESHARAM, V.; HANCHATE, D.; RAMKTEKE, S. D. Machine learning in agriculture domain: A state-of-art survey. **Artificial Intelligence in the Life Sciences**, v. 1, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.aillsci.2021.100010>.

MORENO L DE A, FONSECA DE OLIVEIRA GR, BATISTA TB, BOSSOLANI JW, DUCATTI KR, GUIMARÃES CC, et al. Quality of cowpea seeds: A food security strategy in the tropical environment. **PLoS One**, 17: 1-13, 2022. <https://doi:10.1371/journal.pone.0276136>

OKADA, M.H., OLIVEIRA, G.R.F. DE, SARTORI, M.M.P., CRUSCIOL, C.A.C., NAKAGAWA, J., AMARAL DA SILVA, E.A. Acquisition of the physiological quality of peanut (*Arachis hypogaea* L.) seeds during maturation under the influence of the maternal environment. **PLoS One**, v. 16, e0250293, 2021. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250293>

PATEL RV, PROVART NJ, VERDIER J, LEPRINCE O, BUITINK J. Inference of Longevity-Related Genes from a Robust Coexpression Network of Seed Maturation Identifies Regulators Linking Seed Storability to Biotic Defense Related Pathways. *The Plant Cell*, v. 10, 2015. <https://doi.org/10.1105/tpc.15.00632>

PERISSATO, S. M. **Interação Genótipo ambiente na produtividade, qualidade fisiológica e incidência de sementes verdes em soja (*Glycine max* (L.) Merr.)**. 2019. 104p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu – SP, 2019.

PETRONILIO, A.C.P., MASTRANGELO, C.B., BATISTA, T.B., DE OLIVEIRA, G.R.F., DOS SANTOS, I.L., DA SILVA, E.A.A. Smart and accurate: A new tool to identify stressed soybean seeds based on multispectral images and machine learning models. **Smart Agricultural Technology**, 12, 101042, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101042>

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.R-project.org/>. Acesso: 06 Jun 2024.

RIGHETTI, K., VU, J.L., PELLETIER, S., VU, B.L., GLAAB, E., LALANNE, D., PASHA, A., PATEL, R. V., PROVART, N.J., VERDIER, J., LEPRINCE, O., BUITINK, J. Inference of longevity-related genes from a robust coexpression network of seed maturation identifies regulators linking seed storability to biotic defense-related pathways. **Plant Cell**, 27, 2692–2708, 2015. <https://doi.org/10.1105/tpc.15.00632>

SEHGAL, A., SITA, K., SIDDIQUE, K.H.M., KUMAR, R., BHOGIREDDY, S., VARSHNEY, R.K., HANUMANTHARAO, B., NAIR, R.M., PRASAD, P.V.V., NAYYAR, H. Drought or/and heat-stress effects on seed filling in food crops: Impacts on functional biochemistry, seed yields, and nutritional quality. **Front. Plant Sci.** 871, 1–19, 2018. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01705>

SILVA ANDRÉ, G.; CORADI, P.C.; TEODORO, L.P.R.; TEODORO, P. E. Predicting the quality of soybean seeds stored in different environments and packaging using machine learning. *Scientific Reports*, 12, 8793, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12863-5>

STANIAK, M.S., SZPUNAR-KROK, E., KOCIRA, A. Responses of Soybean to Selected Abiotic Stresses—Photoperiod, Temperature and Water. **Agriculture**, 13, 1–28, 2023. <https://doi.org/10.1002/9781119081005.ch2>

SUDKI, J. M.; FONSECA DE OLIVEIRA, G. R.; MEDEIROS, A. D.; MASTRANGELO, T.; ARTHUR, V.; AMARAL DA SILVA, E. A.; MASTRANGELO, C. B. Fungal identification in peanuts seeds through multispectral images: Technological advances to enhance sanitary quality. **Frontiers Plant Science**, v. 14, 2023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1112916>

TAHERI-GARAVAND, A.; REZAEI NEJAD, A.; FANOURAKIS, D.; FATAHI, S.; AHMADI MAJD, M. Employment of artificial neural networks for non-invasive estimation of leaf water status using color features: a case study in *Spathiphyllum wallisii*. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 43, n. 78, 2021. doi:10.1007/s11738021-03244-y

USDA. (2025). Department of Agriculture. Soybean Explorer. Available online at: <https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=2222000> (accessed on 23 June 2025)

WANG, Y., HAN, Q., KITAJIMA, K., KUROKAWA, H., SHIMADA, T., YAMARYO, T., KABEYA, D., KAWASAKI, T., SATAKE, A. Resource allocation strategies in the reproductive organs of Fagaceae species. **Ecol. Res.** 38, 306–316, 2023. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12350>

WIJEWARDANA, C.; REDDY, K. R.; KRUTZ, L. J.; GAO, W.; BELLALLOUI, N. Drought stress has transgenerational effects on soybean seed germination and seedling vigor. **PLoS ONE**, v. 14, 9: e0214977, 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214977>

XAVIER, D. L. J.; REIS, J. G. M. D. Social Network Analysis on Agricultural International Trade: A Study on Soybean, Soybean Cake and Maize Exports. **Chemistry Proceedings**. 10 (1):37, 2022. <https://doi.org/10.3390/IOCAG2022-12319>

XIAO, H.; CHEN, Z.; YI, S.; LIU, J. Rapid detection of maize seed germination rate based on Gaussian process regression with selection kernel function. **Vibrational Spectroscopy**, v. 129, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2023.103595>

ZHENG, L.; XIE, J. SUN, X.; ZHENG, Y.; MENG, F.; FAN, X.; LI, G.; ZHANG, Y.; WANG, M.; ZHOU, R.; QIU, H.; WANG, S.; JIANG, H. QTL mapping and candidate gene analysis of low-temperature tolerance at the germination stage of soybean. **Plant Breeding**., v. 142, 6, 2023. [10.1111/pbr.13145](https://doi.org/10.1111/pbr.13145)

ZINSMEISTER J, LEPRINCE O, BUITINK J. Molecular and environmental factors regulating seed longevity. *Biochemical Journal*, 477: 305–323, 2020. <https://doi.org/10.1042/BCJ20190165>

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta dos dois capítulos integrando a inteligência artificial no controle de qualidade de sementes, demonstrou ser uma inovação promissora, tanto na predição da longevidade, quanto na avaliação do desempenho fisiológico de lotes de sementes de soja. O trabalho evidenciou que é possível empregar modelos de aprendizado de máquina com robustez e alta eficiência utilizando apenas dados acessíveis e rotineiros de campo e laboratório. O trabalho se destaca por ser uma solução viável e de baixo custo com alto potencial para modernizar o controle interno de qualidade na indústria de sementes, reduzindo o tempo de resultados, subjetividade e auxiliando com maior poder na tomada de decisão. Embora os modelos sejam eficientes, reforça-se que eles não substituem métodos tradicionais, mas complementam e agregam valor ao processo permitindo decisões mais rápidas e assertivas.

## REFERÊNCIAS

- ABBASI, N. A.; HAMRANI, A.; MADRAMOOTOO, C. A.; ZHANG, T.; TAN, C. S.; GOYAL, M. K. Modelling carbon dioxide emissions under a maize-soy rotation using machine learning. **Biosystems Engineering**, v. 212, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.09.013>
- BARBOZA DA SILVA, C.; OLIVEIRA, N. M.; CARVALHO, M. E. A.; MEDEIROS, A. D.; NOGUEIRA, M. L.; REIS, A. R. Autofluorescence-spectral imaging as an innovative method for rapid, non-destructive and reliable assessing of soybean seed quality. **Scientific Reports**, v. 11, 17834, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97223-5>
- BATISTA, T. B.; MASTRANGELO, C. B.; MEDEIROS, A. D.; PETRONILIO, A. C. P.; FONSECA DE OLIVEIRA, G. R.; SANTOS, I. L.; CRUSCIOL, C. A. C.; AMARAL DA SILVA, E. A. A Reliable Method to Recognize Soybean Seed Maturation Stages Based on Autofluorescence-Spectral Imaging Combined With Machine Learning Algorithms. **Frontiers Plant Science**, v. 13, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.914287>
- BETTEY, M. et al. Quantitative genetic analysis of seed vigour and pre-emergence seedling growth traits in Brassica oleracea. **New Phytologist**, v. 148, n. 2, p. 277–286, 2000.
- BEWLEY, J. D. et al. **Seeds: physiology of development, germination and dormancy**. 3. ed. New York: Springer International Publishing, 2013. 408 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 395p.
- CANTERL, K. F. F.; VICENTINI, M. E.; DE LUCENA, W. B.; MORAES, M. L. T.; MONTANARI, R.; FERRAUDO, A. S.; PERUZZI, N. J.; SCALA JR, N. L.; PANOSSO, A. R. Machine learning for prediction of soil CO<sub>2</sub> emission in tropical forests in the Brazilian Cerrado. **Environmental Science Pollution Research**, v. 30, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26824-6>
- DELOUCHE, J. C.; BASKIN, C. C. Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seed lots. **Seed Science Technology**, v. 1, n. 2, p. 427-52, 1973.
- DING, W.; LIN, J.; LI, C.; ZHU, Z.; WU, C.; CAO, J.; LIU, D.; ZHANG, Y.; YANG, Q.; XING, A.; YAO, S.; SUN, Y.; GUO, N.; XING, H.; ZHAO, J. Development of a comprehensive evaluation system and models to determine soybean seed vigor. **Industrial Crops and Products**. v. 224, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120329>.
- ELMASRY, G.; MANDOUR, N.; AL-REJAIE, S.; BELIN, E.; ROUSSEAU, D. Recent Applications of Multispectral Imaging in Seed Phenotyping and Quality Monitoring—An Overview. **Sensors**, v. 19, n. 5, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19051090>

FINCH-SAVAGE, W. E.; BASSEL, G. W. Seed vigour and crop establishment: Extending performance beyond adaptation. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 3, p. 567–591, 2016.

FONSECA DE OLIVEIRA, G. R.; MASTRANGELO, C. B.; HIRAI, W. Y.; BATISTA, T. B.; SUDKI, J. M.; PETRONILIO, A. C. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; AMARAL DA SILVA, E. A. An Approach Using Emerging Optical Technologies and Artificial Intelligence Brings New Markers to Evaluate Peanut Seed Quality. **Frontiers Plant Science**, v. 13, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.849986>

HAMPTON, J. G.; TEKRONY, D. M. **Handbook of vigour test methods**. Zurich: The International Seed Testing Association. 3 ed., 1995. 117p.

HAY, F. R. et al. Seed longevity phenotyping: recommendations on research methodology. **Journal of Experimental Botany**. v. 70, n. 2, p. 425–434, 2019.

HAY, F. R.; VALDEZ, R.; LEE, J. S.; STA CRUZ, P. C. Seed longevity phenotyping: recommendations on research methodology. *Journal of Experimental Botany*, 70, 425–434, 2018. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery358>

INTERNACIONAL SEED TESTING ASSOCIATION (ISTA). 2015. **International Rules for Seed Testing**. Zürich: ISTA, 2015.

KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA-NETO, J. B.; MARCOS-FILHO, J. **Vigor de Sementes: Conceitos e Testes**. Associação Brasileira de Tecnologia de Sementes. Londrina: Abrates, 2020. 601p.

MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de Sementes de Plantas Cultivadas**. 2. ed. Londrina: ABRATES, 2015.

MEDEIROS, A. D.; CAPOBIANGO, N. P.; DA SILVA, J. M.; DA SILVA, L. J.; DA SILVA, C. B.; DIAS, D. C. F. S. Interactive machine learning for soybean seed and seedling quality classification. **Scientific Reports**, v. 10, n. 11267, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68273-y>

POPINIGIS, F. **Fisiologia da semente**. 2.ed. Brasília: AGIPLAN, 1985. 289p.

REHMANI, M. S.; XIAN, B.; WEI, S.; HE, J.; FENG, Z.; HUANG, H.; SHU, K. Seedling establishment: The neglected trait in the seed longevity field, **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 200, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107765>.

ROBERTS, E.H. Storage environment and the control of viability. In: ROBERTS, E.H. (Ed.). *Viability of seeds*. New York: Syracuse University Press, 1972. p.14-58.

SANTOS, A. R. P; FARIA, R. Q.; AMORIM, D. J.; GIANDONI, V. C. R.; DA SILVA, E. A. A.; SARTORI, M. M. P. Cauchy, Cauchy–Santos–Sartori–Faria, logit, and probit functions for estimating seed longevity in soybean. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 2929-2939. 2019.

SILVA ANDRÉ, G.; CORADI, P. C.; TEODORO, L. P. R.; TEODOTO, P. E. Predicting the quality of soybean seeds stored in different environments and

packaging using machine learning. **Scientific Reports**, v. 12, n. 8793, 2022.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-12863-5>

SILVA, N. O. **Controle genético de características associadas à qualidade de sementes de milho**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras: UFLA, 2006, 92 p.

SUDKI, J. M.; FONSECA DE OLIVEIRA, G. R.; MEDEIROS, A. D.; MASTRANGELO, T.; ARTHUR, V.; AMARAL DA SILVA, E. A.; MASTRANGELO, C. B. Fungal identification in peanuts seeds through multispectral images: Technological advances to enhance sanitary quality. **Frontiers Plant Science**, v. 14, 2023.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1112916>

USDA. **Oilseeds: World Markets and Trade**. Washington: United States Department of Agriculture, 2024. Disponível em:  
<<https://fas.usda.gov/sites/default/files/2024-05/oilseeds.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2025.

WEI, J.; LIU, X.; LI, L.; ZHAO, H.; LIU, S.; YU, X.; SHEN, Y.; ZHOU, Y.; ZHU, Y.; SHU, Y.; MA, H. Quantitative proteomic, physiological and biochemical analysis of cotyledon, embryo, leaf and pod reveals the effects of high temperature and humidity stress on seed vigor formation in soybean. **BMC Plant Biology**, v. 20, n. 127, 2020.  
<https://doi.org/10.1186/s12870-020-02335-1>

XAVIER, D. L. J.; REIS, J. G. M. D. Social Network Analysis on Agricultural International Trade: A Study on Soybean, Soybean Cake and Maize Exports. **Chemistry Proceedings**. 10 (1):37, 2022.  
<https://doi.org/10.3390/IOCAG2022-12319>