

**RUBENS ALVES DA SILVA JÚNIOR**

**QUALIDADE FISIOLÓGICA E BIOQUÍMICA DE SEMENTES DE SOJA  
DESSECADAS EM DIFERENTES ESTÁDIOS DE MATURAÇÃO E  
ARMAZENADAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Laércio Junio da Silva

Coorientadora: Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S586q  
2023  
Silva Júnior, Rubens Alves da, 1989-  
Qualidade fisiológica e bioquímica de sementes de soja  
dessecadas em diferentes estádios de maturação e armazenadas /  
Rubens Alves da Silva Júnior. – Viçosa, MG, 2023.  
1 tese eletrônica (91 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Laércio Junio da Silva.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Agronomia, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.437>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Soja - Semente - Qualidade. 2. Soja - Semente -  
Fisiologia. 3. Sementes - Colheita. 4. Enzimas. I. Silva, Laércio  
Junio da, 1984-. II. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em  
Fitotecnia. III. Título.

CDD 22. ed. 633.3421

**RUBENS ALVES DA SILVA JÚNIOR**

**QUALIDADE FISIOLÓGICA E BIOQUÍMICA DE SEMENTES DE SOJA  
DESSECADAS EM DIFERENTES ESTÁDIOS DE MATURAÇÃO E  
ARMAZENADAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 09 de maio de 2023.

Assentimento:

---

Rubens Alves da Silva Júnior  
Autor

---

Laércio Junio da Silva  
Orientador

*Aos meus pais e querida esposa.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por minha saúde, oportunidades e força para superar as dificuldades ao longo da minha vida.

Ao Professor Laércio Junio da Silva pela oportunidade, orientação, ensinamento, calma e amizade.

À professora Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias por todo ensinamento, orientação, paciência e admirável convívio.

Aos amigos e colegas do laboratório de sementes e Grupo de Estudo de Sementes (GSEM), por toda ajuda e incentivo.

Aos colegas e funcionários do laboratório de sementes florestais, por todo apoio.

À minha família tão querida, especialmente meus pais Rubens Alves da Silva e Leidimar Cavalcante de Araújo da Silva pelo carinho, apoio e ensinamento.

Aos pais da minha esposa Alcimar Enéas Rocha Trancoso e Idiomar Cândida dos Reis Trancoso pelo carinho e apoio.

Ao amor da minha vida Ana Clara Reis Trancoso que tem papel fundamental nesse trabalho. Muito obrigado por todo carinho, paciência, apoio e amor!

A todos que apoiaram esse trabalho, sem o esforço de cada um de vocês não seria possível a execução.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Agronomia e ao Departamento de Fitotecnia pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

Ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*Por tudo o que tens feito  
Por tudo o que vais fazer  
Por Tuas promessas e tudo o que És  
Eu quero Te agradecer  
Com todo o meu ser*

*Te agradeço, meu Senhor...  
(Ana Paula Valadão – Te agradeço)*

## RESUMO

SILVA JÚNIOR, Rubens Alves da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2023. **Qualidade fisiológica e bioquímica de sementes de soja dessecadas em diferentes estádios de maturação e armazenadas.** Orientador: Laércio Junio da Silva. Coorientadora: Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias.

Aplicações de dessecantes em pré-colheita pode ser uma alternativa para produção de sementes soja. No entanto, a dessecação em momentos inadequados pode levar a redução da qualidade das sementes. O uso de dessecantes em fase de divisão, expansão, deposição de reservas, por exemplo, podem interferir no desenvolvimento das sementes diminuindo a massa, produtividade e a qualidade fisiológica. Dentre vários fatores que afetam a produção de sementes com esse tratamento, destaca-se o momento da aplicação do dessecante. Assim, objetivou-se com esse estudo avaliar o efeito da dessecação em diferentes estádios de maturação de campo na qualidade de sementes de soja, propor modelos de redes neurais artificiais (ANN) para classificar a qualidade fisiológica das sementes e entender o comportamento de enzimas antioxidantes em sementes de soja submetidas a dessecação em diferentes estádios de maturação de campo, após a colheita e ao longo do armazenamento. Os tratamentos foram compostos por três cultivares de soja de tipo de crescimento indeterminado e três estádios de dessecação. T1: dessecação das plantas no estádio R7, T2: dessecação no estádio R7.3; e T3: plantas não dessecadas e colhidas no estádio R8. O dessecante utilizado foi o Paraquat na dosagem de 400 g ha<sup>-1</sup> de ingrediente ativo. Após a secagem, as plantas foram colhidas, trilhadas e as sementes armazenadas durante oito meses em ambiente de laboratório (temperatura de 18 °C ± 1,8 °C e umidade relativa do ar de 65,6% ± 12,8%). A qualidade das sementes foi avaliada inicialmente e aos quatro e oito meses de armazenamento quanto às características morfológicas, qualidade fisiológica (germinação e vigor) e atividade de enzimas antioxidantes. A dessecação das plantas no estádio R7 levou à produção de sementes com características físicas desuniformes e, em geral, redução da qualidade fisiológica. Neste estádio, foram identificados redução no tamanho, menor acúmulo de matéria seca, maior porcentagem de sementes verdes e maior variação nos índices que determinam a cor e morfologia das sementes. Com acurácia de 100%, as redes neurais artificiais foram eficientes para classificar a qualidade de sementes produzidas de plantas dessecadas nos estádios de maturação de campo R7 e R7.3 e colhidas em R8 sem dessecação. Quanto às características fisiológicas e bioquímicas das sementes, a qualidade variou com o cultivar, momento de dessecação e ambiente de produção. Com relação ao sistema de defesa antioxidativo, foi observado redução

na atividade das enzimas POX após 8 meses de armazenamento em sementes dessecadas nos estádios R7, R7.3 ou colhidas no estágio R8. Já as enzimas APX, CAT e SOD também podem indicar associação com a qualidade fisiológica de sementes de soja dessecadas.

Palavras-chave: Pré-colheita. Estádio fenológico. Morfologia. Vigor. Enzimas. Qualidade.

## ABSTRACT

SILVA JÚNIOR, Rubens Alves da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2023. **Physiological and biochemical quality of desiccated soybean seeds at different maturation stages and stored.** Advisor: Laércio Junio da Silva. Co-advisor: Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias.

Applications of pre-harvest desiccants can be an alternative for soybean seed production. However, desiccation at inappropriate times can lead to reduced seed quality. The use of desiccants in the division, expansion, and reserve deposition phases, for example, can interfere with seed development, reducing mass, productivity, and physiological quality. Among several factors that affect seed production with this treatment, the moment of application of the desiccant is noteworthy. Thus, the objective of this study was to evaluate the effect of desiccation at different stages of field maturation on the quality of soybean seeds, propose models of artificial neural networks (ANN) to classify the physiological quality of seeds, and understand the behavior of antioxidant enzymes in soybean seeds subjected to desiccation at different stages of field maturation after harvest and during storage. The treatments consisted of three cultivars of indeterminate growth type and three desiccation stages. T1: desiccation of plants at the R7 stage; T2: desiccation at the R7.3 stage; and T3: non-desiccated plants harvested at the R8 stage. The desiccant used was Paraquat at a dosage of 400 g ha<sup>-1</sup> of active ingredient. After drying, the plants were harvested, threshed, and the seeds stored for eight months in a laboratory environment (temperature of 18 °C ± 1.8 °C and relative humidity of 65.6% ± 12.8%). Seed quality was evaluated initially and at four and eight months of storage for morphological characteristics, physiological quality (germination and vigor), and antioxidant enzymes activity. The desiccation of plants at the R7 stage led to the production of seeds with uneven physical and physiological characteristics. At this stage, reduction in size, low accumulation of dry matter, a higher percentage of green seeds, and a higher variation in the indices that determine color and morphology were identified in the seeds. With 100% accuracy, the artificial neural networks were efficient to classify the quality of seeds produced from plants that were desiccated in the field maturation stages R7, R7.3, and harvested in R8 without desiccation. For the physiological and biochemical characteristics of the seeds, the quality varied with the cultivar, time of desiccation, and production environment. Regarding the antioxidative defense system, POX enzymes show a strong reduction in their activities after eight months of storage from seeds desiccated at stages R7, R7.3, or harvested at stage R8. The

APX, CAT, and SOD enzymes may also indicate an association with the physiological quality of desiccated soybean seeds.

Keywords: Pre-harvest. Phenological stage. Morphology. Vigor. Enzymes. Quality.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### Capítulo I

- Figura 1.** Dados meteorológicos dos ambientes de produção das sementes no período de colheita (01/01/2020 a 31/03/2020)..... 38
- Figura 2.** Características morfológicas de sementes dessecadas nos estádios R7, R7.3 e colheita em R8 sem dessecação. Cor de sementes: saturação HSL. Geometria de sementes: área, circularidade e variância elíptica. .... 40
- Figura 3.** Porcentagens de sementes retidas nas peneiras 13 a 19 (diâmetro: 5,16 a 7,54 mm). Dessecação em R7, R7.3 e colheita em R8 sem dessecação. .... 41
- Figura 4.** Vigor de sementes de soja de diferentes cultivares dessecadas nos estádios de maturação R7, R7.3 e R8, e armazenadas por oito meses. Análise de componentes principais (PCA), agrupamento de similaridade de tratamento (dendrograma) e tetrazólio (%). R7, R7.3 e colheita em R8 sem dessecação..... 44
- Figura 5.** Acurácia e perda para os dados de validação de modelos de redes neurais artificiais para classificação de lotes de sementes dessecadas. Estádios de dessecação R7, R7.3 e colheita em R8 sem dessecação. (Neurônio/ciclos). DO: DropOut. .... 46

### Capítulo II

- Figura 1.** Dados meteorológicos dos ambientes de produção no período de colheita (01/01/2020 a 31/03/2020)..... 69
- Figura 2.** Atividade de enzimas antioxidantes superóxido dismutase (A), catalase (B), peroxidase do ascorbato (C) e peroxidase (D) de sementes de três cultivares de soja submetidas a dessecação e armazenamento. Médias seguidas por letras iguais minúsculas, comparando os estádios de dessecação, e letras maiúsculas, comparando os períodos de armazenamento, não diferem a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. .... 81
- Figura 3.** *Biplot* da análise de componentes principais e correlação linear de Pearson obtidas dos testes de qualidade fisiológica e análises bioquímicas de três cultivares de soja submetidos a dessecação e armazenamento. Análises: germinação (G), primeira contagem de germinação (PCG), envelhecimento acelerado (EA), condutividade elétrica (CE), emergência de plântulas (EP), índice de velocidade de emergência (IVE), comprimento de total de plântula (CTP), matéria seca de plântulas (MSP), catalase (CAT), peroxidase (POX), peroxidase do ascorbato (APX) e superóxido dismutase (SOD) .Tratamentos: Rx\_yM, onde x: estádio de dessecação em R7, R7.3 ou colheita no estádio R8 e y: armazenamento por 0, 4 ou 8 meses..... 83

## LISTA DE TABELAS

### Capítulo I

**Tabela 1.** Descrição da organização de dados e identificação de classes para geração de modelos de aprendizagem de máquina. .... 36

**Tabela 2.** Características de sementes dessecadas nos estádios R7, R7.3 e colheita em R8 sem dessecação. Saco (sc) corresponde a 40 kg de soja. .... 39

**Tabela 3.** Germinação de sementes de soja de diferentes cultivares dessecadas nos estádios de maturação R7, R7.3 e R8, e armazenadas por oito meses. .... 42

### Capítulo II

**Tabela 1.** Germinação de sementes de soja dos cultivares Zeus, NS 5445 e Foco após dessecação em diferentes estádios e armazenamento. .... 70

**Tabela 2.1.** Primeira contagem de germinação (PCG), envelhecimento acelerado (EA), emergência de plântulas (EP) e condutividade elétrica (CE) obtidos para sementes dos cultivares Zeus, NS 5445 e Foco após dessecação em diferentes estádios e armazenamento. 73

**Tabela 2.2.** Índice de velocidade de emergência (IVE), comprimento de total de plântula (CTP) e matéria seca de plântulas (MSP) obtidos para sementes dos cultivares Zeus, NS 5445 e Foco após dessecação em diferentes estádios e armazenamento. .... 76

**Tabela 3.** Viabilidade e vigor avaliados por meio do teste de tetrazólio em sementes de três cultivares de soja submetidas a dessecação e armazenamento por oito meses. .... 77

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	14
REFERÊNCIAS .....	18
CAPÍTULO I.....	24
REDES NEURAI ARTIFICIAIS PARA CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DE SEMENTES DE SOJA DESSECADAS EM DIFERENTES ESTÁDIOS DE MATURAÇÃO E ARMAZENADAS .....	24
RESUMO .....	25
ABSTRACT .....	27
1. INTRODUÇÃO .....	28
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	31
2.1. Produção, dessecação e armazenamento de sementes .....	31
2.2. Dados meteorológicos.....	32
2.3. Qualidade das sementes .....	32
2.4. Análises morfológicas das sementes.....	32
2.5. Análises fisiológicas das sementes .....	33
2.6. Aprendizado de máquina .....	35
2.7. Análise estatística .....	37
3. RESULTADOS.....	37
3.1. Dados meteorológicos.....	37
3.2. Características morfológica das sementes .....	38
3.3. Características fisiológicas das sementes.....	41
3.4. Redes neurais para reconhecimento de padrões.....	45
4. DISCUSSÃO.....	46
5. CONCLUSÕES.....	50
REFERÊNCIAS .....	51

CAPÍTULO II.....	57
QUALIDADE FISIOLÓGICA E ATIVIDADE ENZIMÁTICA EM SEMENTES DE SOJA DESSECADAS EM DIFERENTES ESTÁDIOS DE MATURAÇÃO E ARMAZENADAS .....	57
RESUMO .....	58
ABSTRACT .....	60
1. INTRODUÇÃO .....	61
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	63
2.1. Obtenção de lotes, pré-colheita e condições de armazenamento .....	63
2.2. Dados meteorológicos.....	64
2.3. Determinação de umidade, testes de germinação e vigor .....	64
2.4. Análises da atividade de enzimas antioxidantes .....	66
2.5. Análise estatística .....	68
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	68
4. CONCLUSÃO .....	84
REFERÊNCIAS .....	85
CONCLUSÃO GERAL .....	91

## INTRODUÇÃO GERAL

A maturação das sementes é uma etapa do processo de desenvolvimento que tem início com a dupla fertilização até atingir a maturidade fisiológica (Goldberg *et al.*, 1994). Ao longo do desenvolvimento das sementes ortodoxas observa-se intensa divisão celular, acúmulo de reservas e capacidade de resistir à dessecação. Naturalmente, essas sementes sofrem a secagem na planta e estão sujeitas a diversos estresses bióticos e abióticos. Vergara *et al.* (2019) aponta que esses estresses levam à redução da qualidade fisiológica das sementes tanto no momento da colheita como durante o armazenamento. Fialho *et al.* (2022) identificaram que colheitas de sementes de soja de diferentes cultivares após 20 e 30 dias do ponto de colheita reduzem o vigor.

Outro problema que chama atenção na produção de sementes é a desuniformidade de maturação e o ciclo de desenvolvimento das plantas. As sementes de cultivares com hábito de crescimento indeterminado e ciclo curto apresentaram maiores produções e maior qualidade fisiológica, sobretudo de sementes do terço médio e superior. Já cultivares de ciclo tardio com tipo de crescimento determinado e semideterminado apresentaram qualidade inferior, independente do terço da planta (Souza *et al.*, 2020; EMBRAPA, 2020; Flores *et al.*, 2016). As sementes do terço superior, em geral, têm maior qualidade fisiológica, porque apresentam maior aporte fotossintético. Por outro lado, as sementes do terço inferior estão sujeitas ao menor aporte fotossintético, além de estarem localizadas em regiões favoráveis a proliferação de patógenos, pragas e altos índices de umidade (Souza *et al.*, 2020).

Durante o desenvolvimento das sementes, a qualidade aumenta progressivamente até atingir a maturidade fisiológica. Esse ponto varia com as espécies e coincide com máximo acúmulo de matéria seca, após o qual pode ocorrer declínio da qualidade das sementes e depois da colheita (Finch-Savage e Bassel, 2016). A soja é uma espécie de grande importância agrícola e tem todos os seus estádios fenológicos bem definidos. A maturidade fisiológica das sementes dessa espécie corresponde ao estágio R7, em que pelo menos uma vagem está madura na haste principal, além de cessar o acúmulo de matéria seca nas sementes (Sediyama *et al.*, 2015). No entanto, a colheita nesse momento não é viável, haja vista a alta porcentagem de umidade nas sementes, nas plantas e grande volume de folhas. Esses fatores podem causar danos de amassamento nas sementes, dificuldade de secagem e embuchamento de maquinário.

Para contornar as condições que impedem a colheita e evitar longos períodos de exposição aos estresses das sementes após a maturidade fisiológica, a dessecação é uma alternativa. A principal vantagem do uso de desseccantes é, dependendo do modo de ação, a rápida secagem e desfolha das plantas (Bezerra *et al.*, 2016). A rápida perda de água das sementes e das plantas por meio desse método permite reduzir a exposição das sementes aos fatores bióticos e abióticos. Vale lembrar que dependendo da intensidade desses fatores adversos, após o ponto de maturidade fisiológica, a perda da qualidade das sementes pode ser intensificada e chegar até o momento que as sementes se tornam inviáveis. Paralelamente, os desseccantes permitem o controle de plantas daninhas e a uniformização dos campos de produção, proporcionando colheitas sem problemas aos maquinários.

A principal desvantagem observada com a dessecação da soja é a redução de produtividade (Bezerra *et al.*, 2016; De Araújo *et al.*, 2018). Além disso, certos produtos desseccantes químicos como glifosato, glufosinato de amônio e saflufenacil não são recomendados, porque levam à redução da qualidade fisiológica das sementes (Daltro *et al.*, 2010; Araújo *et al.*, 2018; Zuffo *et al.*, 2019). A toxicidade e aplicações inadequadas destes produtos podem provocar várias anomalias nas sementes, tais como atrofia do sistema radicular, produção de sementes verdes, redução no acúmulo de matéria seca, alterações morfológicas e redução na germinação e vigor. Essa técnica é muito utilizada nos sistemas de produção de grãos, mas algumas questões ainda precisam ser melhor esclarecidas na produção de sementes, como o momento ideal de dessecação e seu efeito em cultivares de soja com crescimento indeterminado (Bezerra *et al.*, 2016; Szareski *et al.*, 2016; De Araújo *et al.*, 2018; Zuffo *et al.*, 2019).

Aplicações de desseccantes em momentos inadequados podem afetar a qualidade e a produção das sementes. Quando realizadas em estádios que antecedem a maturidade fisiológica levam a redução da produção e do peso das sementes de soja (Bezerra *et al.*, 2016). Segundo Zanatta *et al.* (2018), o uso de desseccantes em fase de divisão, expansão, deposição de reservas pode interferir na mobilização dessas reservas, diminuindo a massa, produtividade e a qualidade fisiológica das sementes. Alguns trabalhos verificaram, por exemplo, redução de até 18% no tamanho das sementes desseccadas no estádio R7. Assim, dessecações feitas antes e no início da maturidade fisiológica impedem o máximo acúmulo de reservas na semente, reduzindo o seu tamanho (Bezerra *et al.*, 2016; Zanatta *et al.*, 2018). A diferença de tamanho tem importantes efeitos no vigor das plântulas, uma vez que em sementes com maior acúmulo de reservas o

desenvolvimento do eixo embrionário e da futura plântula é maior. Em outras palavras, o máximo acúmulo de reservas potencializa o estabelecimento das plântulas e permite melhor performance em condições ambientais desfavoráveis (Finch-Savage, Bassel, 2016; Carvalho e Nakagawa, 2012).

É importante ressaltar que as sementes perdem sua qualidade ao longo do tempo, devido a deterioração, que envolve processos degenerativos constantes que começam na maturidade fisiológica até à perda da viabilidade (Sano *et al.*, 2016). Esse processo que é natural e irreversível, pode ser desacelerado através da adoção de práticas de manejo e conservação das sementes (Mittler, 2017). A deterioração, resultado do desbalanço e acúmulo progressivo de espécies reativas de oxigênio (EROs), levam às sementes a uma série de reações químicas nas biomoléculas. O excesso de EROs pode alterar ou inviabilizar as funções celulares naturais das sementes, resultando em estresse oxidativo, danos e eventualmente perda de qualidade (Mittler, 2017). Dentre os principais danos causados pelo estresse oxidativo estão a degradação dos lipídeos das membranas, oxidação de proteínas, danos aos ácidos nucleicos (DNA e RNA), inibição enzimática e morte celular (Kumar *et al.*, 2015; Ebone *et al.*, 2019).

A magnitude dos danos celulares também é influenciada pela capacidade da semente de eliminar radicais livres e EROs via sistema de defesa antioxidativo enzimático e não enzimático. O sistema antioxidativo enzimático é composto por diversas enzimas, destacando-se a superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase de ascorbato (APX) e peroxidase (POX) (Rajjou e Debeaujon, 2008; Mittler, 2017). Essas enzimas são responsáveis por neutralizar as principais EROs: ânion superóxido ( $O_2^-$ ), peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ). Diante disso, as atividades enzimáticas associadas ao acúmulo de EROs ou desbalanço das EROs com sistema de defesa antioxidativo pode levar à perda de vigor das sementes (Yin *et al.*, 2014).

Portanto, a avaliação das enzimas do sistema antioxidativo podem ser essenciais quanto ao entendimento do potencial fisiológico e variações de qualidade de sementes (Kumar *et al.*, 2015; Ebone *et al.*, 2019). A determinação da qualidade de sementes como um todo envolve a análise crítica de vários testes que podem direcionar o destino dos lotes de sementes. Várias análises podem ser correlacionadas como a porcentagem de germinação, o tempo de germinação, a emergência de plântulas, comprimento de plântulas e a velocidade de germinação. As análises seguem uma padronização na qual permitem identificar se os lotes de

sementes estão livres de danos físicos e doenças, e viabilidade para que a maioria das sementes germinem e produzam plantas normais (Finch-Savage, Bassel, 2016).

A interpretação conjunta do resultado de vários testes de qualidade das sementes pode se tornar difícil e complexa, dependendo do volume de dados. Para diminuir a deficiência e a complexidade de interpretações, outros métodos estão sendo adotados como o utilização de inteligência artificial, por exemplo a Análise Discriminante Linear (LDA), Análise Discriminante por mínimos Quadrados Parciais (PLS-DA), *Random Forest* (RF), *Naive Bayes* (NB), Máquinas de Vetores de Suporte (SVM), Redes Neurais Artificiais (ANN), Rede Neurais Convolucionais (CNN) e Aprendizado de Máquina Interativo (IML) (Andrade et al., 2020; Benedet et al., 2020; Borràs et al., 2015; Kusumaningrum et al., 2018; Medeiros et al., 2021; 2020a; 2020b). O crescente avanço da visão computacional permitiu através desses algoritmos uma revolução em várias áreas da ciência, assim como para área de tecnologia de sementes. O grande volume de dados e de padrões muitas vezes complexos de serem compreendidos por quem não é especialista são facilmente processados pela inteligência artificial.

As redes neurais artificiais são interessantes porque têm capacidade de encontrar relações entre vários tipos de dados. Isso permite aos modelos fazerem previsões, classificações e reconhecimento de padrões complexos de maneira rápida, automática e com alta precisão. As redes são compostas por camadas de neurônios que são basicamente modelos matemáticos simplificados, são funções que dependem dos parâmetros de entrada ( $x_n$ ) e que tem como saída estimada ( $\hat{y}$ ) as respostas dos modelos (Zayegh e Al Bassam, 2018). Então, através de um exemplo de banco de dados de entrada e saída as redes neurais são capazes de aprender os padrões sugeridos e através da aproximação de funções e gerar os modelos de aprendizagem.

Diante do exposto, os objetivos desse estudo foram avaliar o efeito da dessecação em diferentes estádios de maturação de campo na qualidade e atividade de enzimas antioxidantes em sementes de soja logo após a colheita e ao longo do armazenamento; e propor modelos de redes neurais artificiais (ANN) para classificar a qualidade fisiológica das sementes.

## REFERÊNCIAS

- Andrade, G.C., Medeiros Coelho, C.M. and Uarrota, V.G. (2020) Modelling the vigour of maize seeds submitted to artificial accelerated ageing based on ATR-FTIR data and chemometric tools (PCA, HCA and PLS-DA). *Heliyon*, **6**, e03477. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03477>
- De Araújo, D.L., Lazzari, M.P., Dutra, R., Lajús, C.R., Klein, C., Cericato, A., Sordi, A. and Junges, M. (2018) Influence of soybean desiccation periods on its germination potential and yield components. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, **13**, 1–6. <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i4a5584>
- Benedet, L., Faria, W.M., Silva, S.H.G., Mancini, M., Guilherme, L.R.G., Demattê, J.A.M. and Curi, N. (2020) Soil subgroup prediction via portable X-ray fluorescence and visible near-infrared spectroscopy. *Geoderma*, **365**, 114212. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114212>
- Bezerra, A.R.G., Sedyama, T., Borém, A. and Soares, M.M. (2015) Importância Econômica. In *Soja: do Plantio a Colheita* (eds. T. Sedyama, F. Silva & Aluizio Borém), pp. 9–26, UFV, Viçosa, MG.
- Bezerra, A.R.G., Sedyama, T., Cruz, C.D., Dos Santos Silva, F.C., Da Silva, A.F., Rosa, D.P. and Dos Santos Dias, L.A. (2016) Productivity and quality of soybean seeds of determinate and indeterminate growth types desiccated in pre-harvest. *Australian Journal of Crop Science*, **10**, 693–700. <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.05.p7421>
- Borràs, E., Ferré, J., Boqué, R., Mestres, M., Aceña, L. and Busto, O. (2015) Data fusion methodologies for food and beverage authentication and quality assessment - A review. *Analytica Chimica Acta*, **891**, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.04.042>
- BRASIL. (2009) *Regras Para Análise de Semente.*, Primeira (ed Secretaria de Defesa Agropecuária). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília.
- Carvalho, N.M. de and Nakagawa, J. (2012) *Sementes: Ciência, Tecnologia e Produção.*, 5º (ed Funep).
- Chollet, F. (2020) Structured data classification from scratch. URL [https://keras.io/examples/structured\\_data/structured\\_data\\_classification\\_from\\_scratch/](https://keras.io/examples/structured_data/structured_data_classification_from_scratch/) [accessed 20 July 2021]
- CONAB. (2021) *Acompanhamento Da Safra Brasileira de Grãos*. Brasília DF.
- Daltro, E.M.F., Albuquerque, M.C. de F. e, França Neto, J. de B., Guimarães, S.C., Gazziero, D.L.P. and Henning, A.A. (2010) Aplicação de dessecantes em pré-colheita: efeito na

- qualidade fisiológica de sementes de soja. *Revista Brasileira de Sementes*, **32**, 111–122.  
<https://doi.org/10.1590/s0101-31222010000100013>
- Ebone, L.A., Caverzan, A. and Chavarria, G. (2019) Physiologic alterations in orthodox seeds due to deterioration processes. *Plant Physiology and Biochemistry*, **145**, 34–42.  
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.10.028>
- EMBRAPA. (2020) Distribuição vertical da composição química e da uniformidade no tamanho de grãos em plantas de soja de tipo de crescimento determinado e indeterminado. *Boletim de pesquisa e desenvolvimento*, 1–32.
- Fehr, W.R. and Caviness, C.E. (1977) Stages of Soybean Development. *Special report*, **80**, 11.
- Fialho, C.A., Dias, D.C.F. dos S., Pinheiro, D.T., Oliveira, A.M.S., Soares, T.F.S.N. and Silva, L.J. da. (2022) Antioxidant and physiological responses of seeds of soybean cultivars to delayed harvest. *Semina: Ciências Agrárias*, **43**, 1127–1144.  
<https://doi.org/10.5433/1679-0359.2022v43n3p1127>
- Finch-Savage, W.E. and Bassel, G.W. (2016) Seed vigour and crop establishment: Extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, **67**, 567–591.  
<https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>
- Flores, M.F., Panobianco, M. and Konflanz, V.A. (2016) Qualidade fisiológica e rendimento de sementes de soja em função do hábito de crescimento da planta. Universidade Federal do Paraná.
- FRANÇA-NETO, J., KRZYZANOWSKI, F., HENNING, A. and LORINI, I. (2012) Semente esverdeada de soja: causas e efeitos sobre o desempenho fisiológico - Série Sementes. *Circular Técnica-Embrapa soja*, 1–16.
- França Neto, J.B., Krzyzanowski, F.C. and Costa, N.P. da. (1999) Metodologia do teste de tetrazólio em sementes de soja. In *Vigor de Sementes: Conceitos e Testes* (eds. F.C. Krzyzanowski, R.D. Vieira & J. de B. França Neto), p. 218, ABRATES, Londrina, PR.
- Goldberg, R.B., Paiva, G. de and Yadegari, R. (1994) Plant Embriogenesis: Zygote to Seed. *Science*, **266**, 605–614.
- Hurburgh, C.R. (1994) Long-term soybean composition patterns and their effect on processing. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, **71**, 1425–1427.  
<https://doi.org/10.1007/BF02541367>
- IBGE. (2021) Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. URL <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html?=&t=o-que-e> [accessed 18 October

2021]

- INMET, I. de meteorologia. (2023) Instituto de meteorologia (INMET).URL <https://portal.inmet.gov.br/>
- Kumar, S.P.J., Rajendra Prasad, S.R., Banerjee, R. and Thammineni, C. (2015) Seed birth to death: Dual functions of reactive oxygen species in seed physiology. *Annals of Botany*, **116**, 663–668. <https://doi.org/10.1093/aob/mcv098>
- Kurek, K., Plitta-Michalak, B. and Ratajczak, E. (2019) Reactive oxygen species as potential drivers of the seed aging process. *Plants*, **8**, 1–13. <https://doi.org/10.3390/plants8060174>
- Kusumaningrum, D., Lee, H., Lohumi, S., Mo, C., Kim, M.S. and Cho, B.K. (2018) Non-destructive technique for determining the viability of soybean (*Glycine max*) seeds using FT-NIR spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **98**, 1734–1742. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8646>
- Marcos Filho, J. (1999) Teste de envelhecimento acelerado. In *Vigor de Sementes: Conceitos e Testes* (eds. F.C. Krzyzanowski, R.D. Vieira & J. de B. França Neto), p. 218, ABRATES, Londrina, PR.
- Marcos Filho, J. (2015) *Fisiologia de Sementes de Plantas Cultivadas.*, 2nd ed. Abrates, Londrina.
- de Medeiros, A.D., Bernardes, R.C., da Silva, L.J., de Freitas, B.A.L., Dias, D.C.F. dos S. and da Silva, C.B. (2021) Deep learning-based approach using X-ray images for classifying *Crambe abyssinica* seed quality. *Industrial Crops and Products*, **164**. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113378>
- de Medeiros, A.D., Capobianco, N.P., da Silva, J.M., da Silva, L.J., da Silva, C.B. and dos Santos Dias, D.C.F. (2020a) Interactive machine learning for soybean seed and seedling quality classification. *Scientific Reports*, **10**, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68273-y>
- de Medeiros, A.D., da Silva, L.J., Ribeiro, J.P.O., Ferreira, K.C., Rosas, J.T.F., Santos, A.A. and da Silva, C.B. (2020b) Machine learning for seed quality classification: An advanced approach using merger data from FT-NIR spectroscopy and x-ray imaging. *Sensors (Switzerland)*, **20**, 1–12. <https://doi.org/10.3390/s20154319>
- Mittler, R. (2017) ROS Are Good. *Trends in Plant Science*, **22**, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>
- Nakagawa, J. (1999) Testes de Vigor Baseados no Desempenho das Plântulas. In *Vigor de Sementes: Conceitos e Testes* (eds. F.C. Krzyzanowski, R.D. Vieira, & J. de B.F. Neto),

- p. 218, ABRATES, Londrina, PR.
- Noctor, G., Reichheld, J.P. and Foyer, C.H. (2018) ROS-related redox regulation and signaling in plants. *Seminars in Cell and Developmental Biology*, **80**, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2017.07.013>
- Pereira, T., Coelho, C.M.M., Sobiecki, M. and Souza, C.A. (2015) Qualidade fisiológica de sementes de soja em função da dessecação pré-colheita. *Planta Daninha*, **33**, 441–450. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582015000300007>
- Pinheiro, D.T., Dias, D.C.F. dos S., de Medeiros, A.D., Ribeiro, J.P.O., da Silva, F.L. and da Silva, L.J. (2021) Weathering deterioration in pre-harvest of soybean seeds: Physiological, physical, and morpho-anatomical changes. *Scientia Agricola*, **78**. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2020-0166>
- Rajjou, L. and Debeaujon, I. (2008) Seed longevity: Survival and maintenance of high germination ability of dry seeds. *Comptes Rendus - Biologies*, **331**, 796–805. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2008.07.021>
- Rodrigues, M., Gomes-Junior, F.G. and Marcos-Filho, J. (2020) Vigor-S: System for Automated Analysis of Soybean Seed Vigor. *Journal of Seed Science*, **42**, 1–12.
- Sahu, B., Sahu, A.K., Thomas, V. and Naithani, S.C. (2017) Reactive oxygen species, lipid peroxidation, protein oxidation and antioxidative enzymes in dehydrating Karanj (*Pongamia pinnata*) seeds during storage. *South African Journal of Botany*, **112**, 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.06.030>
- Sano, N., Rajjou, L., North, H.M., Debeaujon, I., Marion-Poll, A. and Seo, M. (2016) Staying alive: Molecular aspects of seed longevity. *Plant and Cell Physiology*, **57**, 660–674. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcv186>
- Santos, C.M.R., Menezes, N.L. de and Villela, F.A. (2004) Alterações Fisiológicas E Bioquímicas Em Sementes De Feijão envelhecidas artificialmente. *Revista Brasileira de Sementes*, **26**, 110–119. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222004000100017>
- Sediyama, T., Silva, F. and Borém, A. (2015) *Soja: Do Plantio à Colheita*. (eds T Sediyama, F Silva, and A Borém). UFV, Viçosa, MG.
- Silva, L.J. da, Medeiros, A.D. de and Oliveira, A.M.S. (2019) SeedCalc, a new automated R software tool for germination and seedling length data processing. *Journal of Seed Science*, **41**, 250–257. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v42n2217267>
- Souza, T.R., Araujo, M.E.V., Teixeira, I.R., Guerrero, M.C., Neto, S.P.S. and Corrêa, P.C. (2020) Physiological quality of conventional soybean cultivars of seeds as a function of

- pod position in plant canopy. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, **32**, 336–344. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2020.v32.i5.2100>
- Szareski, J., Zanatta, E., Koch, F., Aisenberg, G.R., Demari, H., Kehl, K., Pimentel, J.R., Carvalho, I.R., Nardino, M., Trombeta, H.W., Souza, V.Q. De, Garbin, E., Pedó, T. and Aumonde, T.Z. (2016) Pre-harvest desiccation and seed production in soybean crops harvest desiccation and seed production in soybean crops.
- Vergara, R., da Silva, R.N.O., Nadal, A.P., Gadotti, G.I., Aumonde, T.Z. and Villela, F.A. (2019) Harvest delay, storage and physiological quality of soybean seeds. *Journal of Seed Science*, **41**, 506–513. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v41n4222413>
- Vieira, R.D. and Krzyzanowski, F.C. (1999) Teste de condutividade elétrica. In *Vigor de Sementes: Conceitos e Testes* (eds. F.C. Krzyzanowski, R.D. Vieira & J. de B. França Neto), p. 218, ABRATES, Londrina, PR.
- Weerasekara, I., Sinniah, U.R., Namasivayam, P., Nazli, M.H., Abdurahman, S.A. and Ghazali, M.N. (2021) The influence of seed production environment on seed development and quality of soybean (*Glycine max* (L.) merrill). *Agronomy*, **11**. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071430>
- Yin, G., Xin, X., Song, C., Chen, X., Zhang, J., Wu, S., Li, R., Liu, X. and Lu, X. (2014) Activity levels and expression of antioxidant enzymes in the ascorbate-glutathione cycle in artificially aged rice seed. *Plant Physiology and Biochemistry*, **80**, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.03.006>
- Zanatta, E., Szareski, V.J., Carvalho, I.R., Koch, F., Pimentel, J.R., Troyjack, C., Dellagostin, S.M., Demari, G.H., Lautenchleger, F., Souza, V.Q. de, Martinazzo, E.G., Villela, F.A., Pedó, T. and Aumonde, T.Z. (2018) Pre-harvest Desiccation: Productivity and Physical and Physiological Inferences on Soybean Seeds During Storage. *Journal of Agricultural Science*, **10**, 354. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n6p354>
- Zanon, A.J., Streck, N.A., da Rocha, T.S.M., Alberto, C.M., Bartz, A.C., de Paula, G.M., Tomiozzo, R., da Costa, L.C., Fensterseifer, C.A., Tagliapietra, E.L., Cardoso, Â.P., Weber, P.S. and Bexaira, K.P. (2016) Growth habit effect on development of modern soybean cultivars after beginning of bloom in Rio Grande do Sul. *Bragantia*, **75**, 446–458. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.535>
- Zayegh, A. and Al Bassam, N. (2018) Neural Network Principles and Applications. *Digital Systems*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80416>
- Zuffo, A.M., Aguilera, J.G., Carvalho, E.R. and Teodoro, P.E. (2020) Harvest times with

chemical desiccation and the effects on the enzymatic expression and physiological quality of soybean seeds. *Revista Caatinga*, **33**, 361–370. <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n209rc>

Zuffo, A.M., Santos, M.D.A. Dos, de Oliveira, I.C., Alves, C.Z., Aguilera, J.G. and Teodoro, P.E. (2019) Does chemical desiccation and harvest time affect the physiological and sanitary quality of soybean seeds? *Revista Caatinga*, **32**, 934–942. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n409rc>

Zuffo, A.M., Zuffo Júnior, J.M., Zambiazzi, E.V. and Steiner, F. (2017) Physiological and sanitary quality of soybean seeds harvested at different periods and submitted to storage1. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, **47**, 312–320. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4747576>

## **CAPÍTULO I**

# **REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS PARA CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DE SEMENTES DE SOJA DESSECADAS EM DIFERENTES ESTÁDIOS DE MATURAÇÃO E ARMAZENADAS**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2023**

## RESUMO

SILVA JÚNIOR, Rubens Alves da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2023. **Redes neurais artificiais para classificação da qualidade de sementes de soja dessecadas e armazenadas em diferentes estádios de maturação.** Orientador: Laércio Junio da Silva. Coorientadora: Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias.

A crescente produção de soja estimula a demanda por sementes com características físicas, fisiológicas, sanitárias e genéticas bem definidas e de alta performance. No entanto, vários fatores afetam a produção de sementes de qualidade, dentre eles o momento para dessecação em pré-colheita. Assim, objetivou-se avaliar o efeito da dessecação em pré-colheita em diferentes estádios de maturação na qualidade de sementes de soja recém-colhidas e armazenadas; e obter modelos utilizando redes neurais artificiais (ANN) a fim de classificar a qualidade fisiológica de sementes dessecadas em diferentes estádios de maturação de campo. Os tratamentos foram compostos por três cultivares de tipo de crescimento indeterminado e três estádios de dessecação. T1: dessecação das plantas no estádio R7, T2: dessecação no estádio R7.3; e T3: plantas não dessecadas e colhidas no estádio R8. O dessecante utilizado foi o Paraquat na dosagem de 400 g ha<sup>-1</sup> de ingrediente ativo. Após a secagem, as plantas foram colhidas, trilhadas e as sementes armazenadas durante oito meses em ambiente de laboratório (temperatura de 18 °C ± 1,8 °C e umidade relativa do ar de 65,6% ± 12,8%). A qualidade das sementes foi avaliada inicialmente e aos quatro e oito meses de armazenamento quanto a características morfológicas e qualidade fisiológica (germinação e vigor). Os dados foram submetidos à análise de variância e comparação de médias, além de análise multivariada de componentes principais. Por fim, foram obtidos modelos de predição utilizando algoritmos de redes neurais artificiais. A dessecação das plantas no estádio R7 levou à produção de sementes com características físicas e fisiológicas desuniformes. Neste estádio, foram identificados nas sementes redução no tamanho, menor acúmulo de matéria seca, maior porcentagem de sementes verdes e maior variação nos índices que determinam a cor e morfologia. Durante o período de colheita, o cultivar Foco esteve sujeito, em maior frequência, a oscilações de chuva, temperatura e umidade comparando com os cultivares Zeus e NS 5445. Diferente para Zeus e NS 5445, os tratamentos em R7.3 e R8 do cultivar Foco, que ficaram por mais tempo nessas condições, tiveram impacto no vigor das sementes e acarretou em menor porcentagem de germinação e vigor, avaliado pelo teste de envelhecimento acelerado, baixos índices de velocidade de germinação e plântulas menores. Com acurácia de 100%, as redes neurais artificiais classificaram a qualidade de sementes produzidas de plantas dessecadas.

Palavras-chave: Pré-colheita. Estádio fenológico. Morfologia. Vigor.

## ABSTRACT

SILVA JÚNIOR, Rubens Alves da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2023. **Artificial neural networks for classifying the quality of desiccated and stored soybean seeds at different maturation stages.** Advisor: Laércio Junio da Silva. Co-advisor: Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias.

The growing soybean production stimulates the demand for seeds with well-defined physical, physiological, sanitary, and genetic characteristics, as well as high performance. However, several factors affect the production of high-quality seeds, including the timing of pre-harvest desiccation. The objective was to evaluate the effect of pre-harvest desiccation at different stages of maturation on the quality of freshly harvested and stored soybean seeds. Additionally, the aim was to develop models using artificial neural networks (ANN) to classify the physiological quality of desiccated seeds at different field maturation stages. Treatments consisted of three cultivars of indeterminate growth type and three desiccation stages. T1: desiccation of plants at the R7 stage; T2: desiccation at the R7.3 stage; and T3: non-desiccated plants harvested at the R8 stage. The desiccant used was Paraquat at a dosage of 400 g ha<sup>-1</sup> of active ingredient. After drying, the plants were harvested, threshed, and the seeds stored for eight months in a laboratory environment (temperature of 18 °C ± 1.8 °C and relative humidity of 65.6% ± 12.8%). Seed quality was evaluated initially and at four and eight months of storage for morphological characteristics, physiological quality (germination and vigor). Data were subjected to analysis of variance and mean comparison, as well as multivariate principal component analysis. Finally, artificial neural network algorithms were used to generate prediction models. The desiccation of plants at the R7 stage led to the production of seeds with uneven physical and physiological characteristics. At this stage, reduction in size, low accumulation of dry matter, a high percentage of green seeds, and high variation in the indices that determine color and morphology were identified in the seeds. As comparison to the Zeus and NS 5445 cultivars, the Foco cultivar was more frequently exposed to changes in rainfall, temperature, and humidity during the harvest period. The treatments at R7.3 and R8 of the Foco cultivar, which remained under these conditions for a longer period than Zeus and NS 5445, had an effect on the vigor of the seeds, leading to lower percentage of germination, vigor, evaluated by the accelerated aging test, low speed of germination, and smaller seedlings. With an accuracy of 100%, artificial neural networks successfully classified the quality of seeds produced from desiccated plants.

Keywords: Pre-harvest. Phenological stage. Morphology. Vigor.

## 1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma das principais culturas agrícolas no mundo. Os grãos de soja possuem elevados teores de proteína e óleo com 35 – 50% e 15 – 25%, respectivamente (Hurburgh, 1994; Bezerra *et al.*, 2015). É fonte de produção de farelo, óleo e diversos alimentos para animais e humanos. O Brasil está entre os maiores produtores de soja, com produções superiores a 135 milhões de toneladas (CONAB, 2021). A crescente produção no Brasil vem acompanhada do aumento da área plantada. De acordo com o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – LSPA, a área plantada teve crescimento de 76% nos últimos 15 anos (IBGE, 2021). Além do aumento da área, a produtividade avançou com o desenvolvimento de tecnologias, melhoramento genético, maquinários, adubação, sementes e defensivos. Vale destacar também que a soja é impulsionada pela demanda de indústrias e preços praticados no mercado internacional, ambos governados pelo consumo.

Nos últimos anos, as cultivares com hábito de crescimento indeterminado tornaram-se a preferência dos produtores de soja no Brasil (Souza *et al.*, 2020). Essas cultivares têm como característica a sobreposição das fases vegetativa e reprodutiva, ou seja, continuam emitindo nó e alongando a haste principal até próximo da fase de enchimento de grãos. Diferentemente de cultivares com hábito de crescimento determinado e semideterminado, elas não terminam o ciclo com uma inflorescência racemosa na haste principal. Já os cultivares semideterminado também diferenciam o número de nós após a floração, mas por um curto período (Sediyama *et al.*, 2015). Durante a sobreposição das fases vegetativa e reprodutiva, a estatura e número de nós após o florescimento podem variar com o tipo de crescimento, grupo de maturidade relativa, local e época de semeadura (Zanon *et al.*, 2016).

A sobreposição da fase vegetativa com a reprodutiva permitiu aos produtores terem algumas vantagens, como a possibilidade de usar cultivares precoces de crescimento indeterminado para auxiliar na superação de estresses bióticos e abióticos (Zanon *et al.*, 2016; EMBRAPA, 2020). Outro ponto positivo, é que essa adaptação, em relação a diversas condições climáticas, pode garantir ou aumentar a produtividade das safras (Souza *et al.*, 2020). Além disso, produzem mais grãos por planta, constantemente desenvolvem novos ramos e vagens, permitindo flexibilidade para o manejo de defensivos e antecipar ou atrasar semeaduras. Isso possibilita o plantio antecipado da safrinha e menores riscos para o próximo plantio.

Portanto, essas características justificam a preferência dos sojicultores por cultivares de soja com o tipo de crescimento indeterminado (Zanon *et al.*, 2016).

Nas plantas com o tipo de crescimento indeterminado, a maturação das vagens ocorre de baixo para cima (Sediyama *et al.*, 2015). Assim, durante a maturação pode haver diferenças de produção e qualidade de sementes na planta de soja. A qualidade das sementes está associada a uma série de eventos ambientais que também correspondem ao seu processo de maturação, ao tipo de crescimento e arquitetura foliar. Souza *et al.* (2020) apontam que as sementes do terço superior têm maior qualidade fisiológica devido à maior atividade fotossintética da planta. Por outro lado, as sementes do terço inferior estão sujeitas ao menor aporte fotossintético, além de estarem localizadas em regiões favoráveis à proliferação de patógenos, pragas e altos índices de umidade. Além disso, fatores bioquímicos como os teores de óleo, proteína, isoflavonas e ácidos graxos nas sementes são alterados e podem influenciar a qualidade fisiológica, dependendo da posição que ocupam na planta e pelo tipo de crescimento (EMBRAPA, 2020).

Considerando o processo de maturação, a semente passa por um conjunto de etapas que se inicia com a dupla fertilização até atingir a maturidade fisiológica. Esse processo envolve alterações de natureza morfológica, fisiológica e bioquímica (Goldberg *et al.*, 1994). Assim, alterações na dupla fertilização, embriogênese e maturação podem levar a desuniformidades nas sementes e, conseqüentemente, perda de qualidade. A maturação desuniforme associada à ocorrência de estresses como ataque de pragas, doenças, desbalanço nutricional e desequilíbrio de água em momentos cruciais no desenvolvimento das plantas são alterações importantes que se não controladas podem afetar a qualidade das sementes.

Para contornar este problema, há alternativa de utilizar produtos químicos dessecantes de modo a evitar perdas na qualidade das sementes. Esses produtos viabilizam a colheita e reduzem a exposição das sementes aos fatores bióticos e abióticos. Além disso, permitem a secagem das plantas, desfolha, controle de plantas daninhas e padronização do campo. Dessa forma, bastaria para o produtor fazer a dessecação das plantas e colher as sementes no seu estágio de maior vigor. Porém, na prática não é o que tem sido observado haja vista as diferentes opções de dessecantes, cultivares e condições climáticas em campo. A primeira desvantagem relatada com a dessecação da soja é a redução de produtividade (Bezerra *et al.*, 2016; De Araújo *et al.*, 2018). Além disso, certos dessecantes químicos como glifosato, glufosinato de amônio e saflufenacil não são recomendados, porque levam à redução da qualidade fisiológica de

sementes de soja (Daltro *et al.*, 2010; De Araújo *et al.*, 2018; Zuffo *et al.*, 2019). A toxidade destes produtos pode provocar várias anomalias nas sementes como atrofia do sistema radicular, produção de sementes verdes, redução no acúmulo de matéria seca, alterações morfológicas e redução na germinação e vigor.

Outra dúvida que permanece é a definição do momento ideal para fazer a dessecação das plantas. Pereira *et al.* (2015) indicou que a dessecação no estágio R7.1 pode proporcionar sementes com maior viabilidade e vigor. Já Zanatta *et al.* (2018) relatam que a aplicação de desseccante nos estádios R7.1 e R7.3 levam a redução no vigor das sementes. Por outro lado, Bezerra *et al.* (2016) observaram redução de produtividade e vigor das sementes quando a dessecação foi realizada em R5.7 e R6.5. Já com a dessecação realizada em R7.3, a produção e o vigor não foram alterados quando comparado às sementes colhidas em R8. Esses resultados indicam que a qualidade das sementes varia dependendo do genótipo, ambiente e tipo de desseccante.

A avaliação da qualidade fisiológica das sementes é feita a partir da associação de diferentes testes que avaliam vários componentes da qualidade das sementes e cujas interpretações podem garantir diferentes estratégias quanto ao destino dos lotes. É verdade também, que a qualidade das sementes impacta diretamente no estabelecimento e produtividade das lavouras (Finch-Savage e Bassel, 2016). Por essa razão, diversas análises são feitas para avaliar a qualidade das sementes e identificar a capacidade da semente originar plântulas normais, ou seja, uma plântula com estrutura radicular e parte aérea bem desenvolvidas em condições normais (BRASIL, 2009). No entanto, a interpretação de vários testes é difícil e complexa dependendo do volume de dados. Para diminuir a deficiência e complexidade de interpretações outros métodos estão sendo adotados como o uso da inteligência artificial.

O uso de algoritmos de redes neurais na avaliação da qualidade de sementes de soja pode apresentar diversos benefícios. Esses algoritmos têm a capacidade de lidar com dados complexos e não lineares, capturando padrões sutis e relacionamentos entre as variáveis de qualidade das sementes. As redes neurais são compostas por camadas de neurônios que são basicamente modelos matemáticos simplificados, imitando um neurônio biológico. Esses modelos são funções que dependem dos parâmetros de entrada ( $x_n$ ) e que tem como saída estimada ( $\hat{y}$ ) as respostas dos modelos (Zayegh e Al Bassam, 2018). Com um conjunto de dados, os modelos podem ter o comportamento dos sistemas clássicos de interpretações de forma mais

rápida e eficiente (Chollet, 2020). Nesse sentido, a busca por métodos rápidos e precisos de avaliação é de grande vantagem tanto para a pesquisa quanto para o desenvolvimento de mercado. Na área de qualidade de sementes essas análises já são realidade (Medeiros et al., 2021; 2020a; 2020b; Benedet et al., 2020; Andrade et al., 2020; Kusumaningrum et al., 2018; Borràs et al., 2015).

Assim, esse trabalho teve como objetivos avaliar o efeito da dessecação em pré-colheita em diferentes estádios de maturação na qualidade de sementes de soja recém-colhidas e armazenadas; e obter modelos utilizando redes neurais artificiais (ANN) a fim de classificar a qualidade fisiológica de sementes de plantas dessecadas em diferentes estádios de maturação.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Produção, dessecação e armazenamento de sementes**

As sementes de soja foram produzidas por produtores de sementes sediados em locais com condições climáticas diferentes, região Sul (Toledo - PR) e Cerrado (Rio Verde - GO) do Brasil. Nessas condições, os tratamentos de dessecação e todos os tratamentos culturais foram simulados em nível comercial de produção na safra 2019/2020. Plantas de três cultivares com hábito de crescimento indeterminado, Brasmax Zeus IPRO, NS 5445 IPRO (GMR: 5-6, Toledo - PR) e Brasmax Foco IPRO (GMR: 7-8, Rio Verde - GO) foram dessecadas em dois estádios de maturação (R7 e R7.3). O tratamento controle consistiu na colheita das sementes no estádio R8, sem dessecação.

A identificação dos estádios de maturação das plantas, R7, R7.3 e R8, foi feita de acordo com Fehr e Caviness (1977). Os estádios de maturação foram determinados pela média ponderal de plantas amostradas e sua respectiva maturação. O estádio R7 correspondeu ao início da maturação das vagens no campo. Já o estádio R7.3 correspondeu a maturação intermediária entre o início da maturação e o ponto de colheita (R8). O ponto de colheita foi identificado pela maturação plena das plantas e grau de umidade de sementes inferior a 15%. As sementes colhidas no estádio R8 não foram dessecadas para efeito de comparação com os demais tratamentos.

A dessecação foi feita com o herbicida Paraquat na dosagem de 400 g ha<sup>-1</sup> do ingrediente ativo aplicado por meio de pulverizador nos estádios de maturação de campo R7 e R7.3. Após

a secagem das plantas foi feita a colheita e a trilhagem. Em seguida, as sementes foram armazenadas em sacos de papel durante oito meses em ambiente refrigerado com temperatura de  $18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $65,6\% \pm 12,8\%$ .

## 2.2. Dados meteorológicos

Dados climáticos foram coletados de estações meteorológicas referente ao seguinte período de colheita: 01/01/2020 a 31/03/2020. Foram extraídos dados diários de temperatura máxima/mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa máxima/mínima (UR%) e precipitação (mm) dos municípios de Rio Verde – GO e Toledo – PR das estações meteorológicas 83470 e S835, respectivamente (INMET, 2023).

## 2.3. Qualidade das sementes

Todas as análises de qualidade das sementes foram realizadas no Laboratório de Pesquisa de Sementes do Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. Foram realizadas análises relacionadas às características morfológicas e fisiológicas das sementes. As análises foram realizadas após a colheita, no quarto e oitavo mês de armazenamento. Para a interpretação dos dados obtidos, foi utilizado aprendizagem de máquina.

## 2.4. Análises morfológicas das sementes

**Peso de mil sementes:** Foram contadas, ao acaso, oito repetições de 100 sementes. Em seguida, as sementes de cada repetição foram pesadas em balança com precisão de 0,001 g. O resultado foi calculado multiplicando por 10 o peso médio (em gramas) obtido das repetições de 100 sementes (BRASIL, 2009).

**Sementes verdes:** A coloração verde externa das sementes foi estimada visualmente a partir de quatro amostras de 100 sementes. Os resultados foram expressos em porcentagem de sementes esverdeadas (Bezerra *et al.*, 2016).

**Uniformidade de sementes:** As porcentagens de sementes retidas em peneiras foram feitas a partir de duas repetições de 100 g de sementes. As peneiras foram dispostas colocando numerações de peneiras inferiores com crivo redondo imediatamente abaixo das peneiras

superiores, na seguinte ordem: 19 > 18 > 17 > 16 > 15 > 14 > 13 mesh. Os resultados foram expressos em percentagem de sementes retidas por peneira (BRASIL, 2009).

**Cor e forma geométrica de sementes:** Foram utilizadas quatro repetições de 100 sementes por tratamento. As sementes foram organizadas em papel transparente Contact® e enquadradas nas demarcações da bandeja de acrílico transparente do equipamento GroundEye®, de maneira que as sementes não se tocassem. Os dados das imagens foram processados pelo software GroundEye® e as seguintes características de cor e morfologia das sementes foram extraídas pelo software: saturação de cor HSL, circularidade, área e variância elíptica.

## 2.5. Análises fisiológicas das sementes

**Grau de umidade:** O teor de água das sementes foi determinado pelo método de estufa a 105 °C por 24 h a partir de duas repetições com 50 sementes cada. Os resultados foram expressos em porcentagem (BRASIL, 2009).

**Pré-condicionamento:** Método utilizado para evitar danos por embebição rápida em sementes com grau de umidade menor que 10% submetidas a testes de germinação e vigor. Assim, foi realizado o pré-condicionamento das sementes sobre tela metálica em caixa Gerbox® contendo 40 mL de água, pelo período de 16 horas a 25 °C até atingirem umidade final de aproximadamente 15% (BRASIL, 2009).

**Germinação:** Foram utilizadas quatro repetições de 50 sementes cada. As sementes foram semeadas em rolos de papel Germitest® previamente umedecidos com água destilada no volume de 2,5 vezes o peso do papel seco. Posteriormente, foram confeccionados rolos e mantidos em germinador tipo Mangelsdorf a 25 °C. No quinto e oitavo dia após a semeadura foi feita a contagem do número de plântulas normais. Os resultados foram expressos em porcentagem (BRASIL, 2009).

**Primeira contagem de germinação:** O teste foi feito em conjunto com o teste de germinação. O número de plântulas normais foi contabilizado no quinto dia após o início do teste. Os resultados foram expressos em porcentagem (Nakagawa, 1999).

**Envelhecimento acelerado:** Amostras de 42 g de sementes de cada lote foram organizadas sobre tela metálica acoplada a caixa tipo Gerbox®, contendo 40 ml de água

destilada. Em seguida, as caixas foram tampadas e levadas para uma câmara tipo BOD a 41 °C durante 48 h (Marcos Filho, 1999). Após este período, as sementes foram submetidas ao teste de germinação com quatro repetições de 50 sementes, conforme descrito anteriormente. No quinto dia após o início do teste de germinação foi realizada a contagem do número de plântulas normais. Os resultados foram expressos em porcentagem.

**Condutividade elétrica:** A análise foi realizada com quatro repetições de 50 sementes. As sementes foram pesadas e, em seguida, colocadas em copos plásticos contendo 75 ml de água destilada, que foram mantidos a 25 °C durante 24 h. Após este período, foram realizadas leituras de condutividade elétrica da solução por meio de condutivímetro modelo Digmed DM-31. Os resultados foram expressos em  $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$  (Vieira and Krzyzanowski, 1999).

**Emergência de plântulas:** As sementes foram semeadas em bandejas para preparação de mudas de 200 células. Assim, cada bandeja correspondeu a quatro repetições com 50 sementes. As bandejas foram preenchidas com areia previamente umedecida até a capacidade de campo. Em seguida, as sementes foram semeadas, irrigando-se sempre que necessário. Avaliações de plântulas emergidas foram feitas diariamente. Consideramos emergidas as plântulas com os cotilédones acima e sem tocar a superfície do substrato. Os resultados foram expressos em porcentagem de emergência. A contagem diária de plântulas do teste de emergência permitiu extrair parâmetros sobre a performance das sementes. Para isso a contagem diária de plântulas emergidas foi organizada de acordo com o modelo descrito no software SeedCalc (Silva *et al.*, 2019). Foram extraídos dados sobre os índices de velocidade, uniformidade e variância de emergência dos lotes de sementes.

**Crescimento de plântulas:** O teste foi realizado com quatro repetições de 20 sementes. As sementes foram colocadas para germinar em papel Germitest® umedecido com 2,5 vezes o peso do papel seco. Foram confeccionados rolos e estes mantidos em germinador tipo Mangelsdorf a 25 °C por três dias. As plântulas foram escaneadas e a captura das imagens e procedimentos de avaliação foram realizados de acordo com Rodrigues (2020). As imagens foram processadas no software Vigor-S para obtenção de dados de comprimento (cm), índices de crescimento e vigor das plântulas.

**Matéria seca de plântulas:** foi realizado com quatro repetições de 20 sementes, conforme descrito para a análise de crescimento de plântulas, porém as plântulas foram avaliadas no quinto dia após a montagem do teste. As plântulas inteiras sem os cotilédones

foram colocadas em sacos de papel tipo Kraft. O material foi mantido em estufa de circulação de ar forçado, por 72 h, a 65 °C. Após a secagem, o material vegetal foi pesado em balança de precisão (0,001 g) para determinação da matéria seca. Os resultados foram expressos em mg plântula<sup>-1</sup>.

**Teste de tetrazólio:** Foi conduzido com duas repetições de 50 sementes. As amostras foram embebidas em papel Germitest® umedecido com volume de água destilada equivalente a 2,5 vezes o peso do papel seco. As sementes permaneceram nestas condições por 16 h a 25 °C. Em seguida, as sementes foram armazenadas em copos plásticos contendo solução de sal de tetrazólio na concentração de 0,075%. Os copos com as sementes e a solução de tetrazólio foram mantidos em câmara tipo BOD a 37 °C, no escuro, por 2 horas. Após este período, as sementes foram lavadas em água corrente e mantidas submersas em água destilada na temperatura de 10 °C até o momento das análises. As sementes foram avaliadas individualmente e os resultados foram expressos em porcentagem de viabilidade e vigor (França Neto *et al.*, 1999).

## 2.6. Aprendizado de máquina

Os dados obtidos nos testes de germinação e de vigor foram organizados em uma matriz, onde X corresponde as variáveis preditoras e Y as variáveis respostas (classificação do momento ideal de dessecação das plantas que deram origem a sementes de maior qualidade fisiológica (Tabela 1). Os modelos de predição foram criados por meio do algoritmo de aprendizado de redes neurais artificiais (ANN) (Chollet, 2020). Os dados foram divididos em 80% para treinamento e 20% para testes de validação. Os seguintes ajustes de hiperparâmetros foram testados em cada modelo: Número de Neurônios – NN (16 e 32), *Dropout* (0; 0,2; 0,5) e Ciclos (30 e 50). As performances dos modelos foram avaliadas por meio da validação de perda e acurácia.

Tabela 1. Descrição da organização de dados e identificação de classes para geração de modelos de aprendizagem de máquina.

<b>Amostras</b>	<b>Cultivares x dessecação x armazenamento x repetições</b>		<b>Total de entradas</b>	
Cultivares	Cultivares de soja: "Zeus", "NS 5445" e "Foco"		108	
Dessecação	Estádio de dessecação "R7", "R7.3" e "R8 sem dessecação"			
Armazenamento	Armazenamento em meses (0, 4 e 8)			
Repetição	Quatro			
<b>Variáveis</b>	<b>Descrição</b>	<b>Matriz</b>	<b>Tipo de dado</b>	
G	Germinação (%)	X	Numérico	
PCG	Primeira contagem de germinação (%)		Numérico	
EP	Emergência de plântulas (%)		Numérico	
CP	Comprimento de plântulas (cm)		Numérico	
Vigor	Índice vigor		Numérico	
IC	Índice de crescimento		Numérico	
IU	Índice de uniformidade (Unif_2)		Numérico	
MSP	Matéria seca de plântula (mg)		Numérico	
EA	Envelhecimento acelerado (%)		Numérico	
CE	Condutividade elétrica ( $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$ )		Numérico	
IVE	Índice de velocidade de emergência		Numérico	
T50	T50: Tempo para emergir 50% de plântulas		Numérico	
UG	Uniformidade de germinação (UnifG)		Numérico	
TMG	Tempo médio de germinação		Numérico	
CVG	Coefficiente de velocidade de germinação		Numérico	
P100	Peso de 1000 sementes (g)		Categórico e Numérico	
SV	Sementes verdes (%)		Categórico e Numérico	
UC	Umidade de sementes na colheita (%) (ideal e alta)		Categórico	
Dess.Ideal	Dessecação ideal (alto vigor) (Sim: 0 e Não:1)		Y	Categórico

## **2.7. Análise estatística**

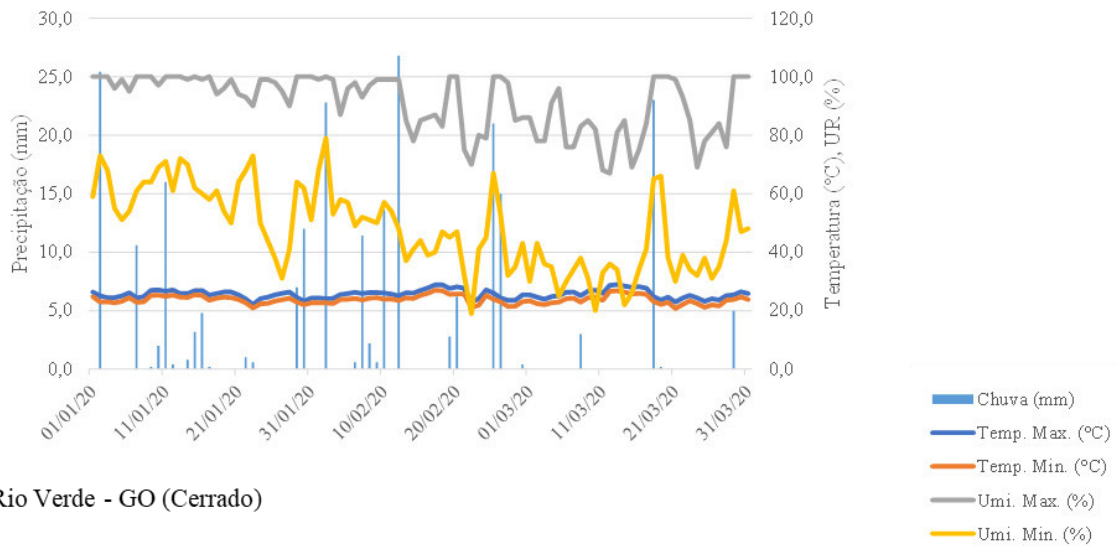
Os testes de qualidade fisiológica foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado, no esquema de parcelas subdivididas, sendo que os períodos de armazenamento foram alocados nas parcelas e os tratamentos de dessecação nas subparcelas, com quatro repetições. Os dados foram analisados individualmente para cada genótipo. Os dados foram submetidos à análise de variância e comparação múltipla, teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Análises multivariadas de componentes principais (PCA) e dendrogramas por meio de distanciamento euclidiano também foram realizadas para a combinação de todas as variáveis de qualidade fisiológica. As análises estatísticas foram processadas no programa R (R Core Team, 2022). Os modelos de aprendizado de máquina foram criados com TensorFlow 2.3.

## **3. RESULTADOS**

### **3.1. Dados meteorológicos**

Durante o período de colheita, os cultivares Zeus e NS 5445 estiveram sujeitos, em menor frequência, à ocorrência de chuvas e oscilações de temperatura e umidade, comparados ao cultivar Foco (Figura 1). As sementes do cultivar Foco foram cultivadas em Rio Verde e estiveram expostas a chuvas superiores a 80 mm, além de muitos períodos de chuva. É notável também a diferença de temperaturas máximas e mínimas entre os locais onde foram produzidas as sementes no cerrado e sul do Brasil. Baixa diferença nas temperaturas foram observadas no município de Toledo onde foram produzidas as sementes dos cultivares Zeus e NS 5445 e alta diferença nas temperaturas foram observadas no município de Rio Verde. Também em Rio Verde, a umidade relativa apresentou baixa amplitude entre máxima e mínima, mantendo a umidade alta ao longo do período de colheita. Ao contrário, em Toledo, a alta amplitude da umidade relativa pode indicar períodos mais secos ao longo do dia e durante a colheita.

## Toledo - PR (Sul)



## Rio Verde - GO (Cerrado)

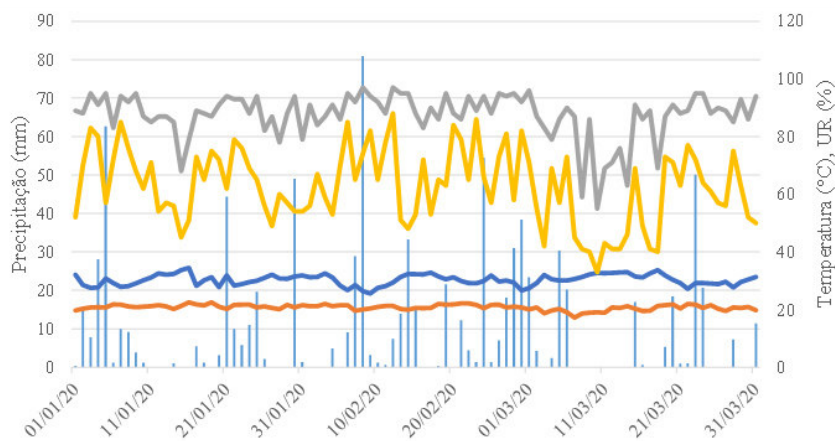


Figura 1. Dados meteorológicos dos ambientes de produção das sementes no período de colheita (01/01/2020 a 31/03/2020).

### 3.2. Características morfológica das sementes

A produtividade de sementes reduziu com a dessecação das plantas no estágio R7 nos três cultivares. A redução na produção em relação a sementes colhidas em R8 sem dessecação foi de 10%, 7% e 13% inferior nos cultivares Zeus, NS 5445 e Foco, respectivamente. Em relação a umidade de colheita, as sementes dos cultivares Zeus e NS 5445 foram colhidas com umidade na faixa de 13 a 14%. Já as sementes do cultivar Foco apresentaram umidade de colheita na faixa de 15 a 23%, considerada alta e de risco para obtenção de sementes de boa qualidade. O aumento da umidade das sementes correspondeu aos tratamentos que ficaram por mais tempo no campo como as plantas desseçadas no estágio R7.3 e as plantas que foram colhidas em R8 sem dessecação (Tabela 2).

Quanto ao peso, as sementes produzidas de plantas dessecadas no estágio R7 ficaram mais leves, já as sementes mais pesadas e de maneira crescente para todos os cultivares corresponderam a sementes dessecadas em R7.3 e colhidas em R8 sem dessecação. Outra característica importante para a produção de sementes de qualidade é a quantidade de sementes verdes. Os cultivares Zeus e NS 5445 apresentaram alta incidência de sementes verdes quando foram dessecados no estágio R7. Já as sementes produzidas em plantas dessecadas a partir de R7.3 apresentaram menor proporção de sementes verdes. Por outro lado, as sementes do cultivar Foco apresentaram baixa incidência de sementes verdes (< 11%) em todos os tratamentos de dessecação (Tabela 2).

Tabela 2. Características de sementes dessecadas nos estádios R7, R7.3 e colheita em R8 sem dessecação. Saco (sc) corresponde a 40 kg de soja.

Cultivar	Avaliações (média)	Estádio de Dessecação		
		R7	R7.3	R8
Zeus	Umidade de colheita (%)	13	13	14
	Produtividade (sc ha <sup>-1</sup> )	85	92	94
	Peso de mil sementes (g)	169	176	183
	Sementes verdes (%)	24	11	7
NS 5445	Umidade de colheita (%)	13	13	14
	Produção (sc ha <sup>-1</sup> )	76	83	82
	Peso de mil sementes (g)	169	178	176
	Sementes verdes (%)	27	11	8
Foco	Umidade de colheita (%)	15	18	23
	Produção (sc ha <sup>-1</sup> )	67	75	77
	Peso de mil sementes (g)	137	145	162
	Sementes verdes (%)	10	9	11

Análises de imagem permitiram identificar diferenças de saturação HSL atribuída às cores de cada semente (Figura 2). A dessecação das sementes no estágio R7 levou a variações mais amplas de cores, o que também sugere maturação heterogênea para essas sementes, sendo esse comportamento similar para os três cultivares. Já as plantas dessecadas no estágio R7.3 produziram sementes com menores variações de cor, assim como as sementes colhidas em R8 sem dessecação, nos cultivares Zeus e NS 5445. Diferentemente, as sementes dessecadas no



O tamanho das sementes variou entre os tratamentos de dessecação (Figura 3). Na dessecação realizada em R7, todos os cultivares produziram sementes menores. Já sementes de plantas dessecadas no estágio R7.3 e R8 sem dessecação apresentaram tamanho semelhantes. As peneiras que mais acumularam sementes foram as de numeração 16 a 18 para os cultivares Zeus e NS 5445. Dessecações no estágio R7 resultaram em maior porcentagem de sementes retidas na peneira 16, Zeus 30% e NS 5445 32% (Figura 3). Enquanto dessecações das plantas destes cultivares em R7.3 ou colheitas em R8 sem dessecação tiveram maiores porcentagens de sementes retidas na peneira 18 e 17, respectivamente. Já o cultivar Foco apresentou maior acúmulo de sementes nas peneiras 15 e 16 (Figura 3). Dessecações em R7 tiveram maior acúmulo de sementes na peneira 15 e dessecações em R7.3 ou colheitas em R8 tiveram maior acúmulo de sementes retidas na peneira 16 (Figura 3).

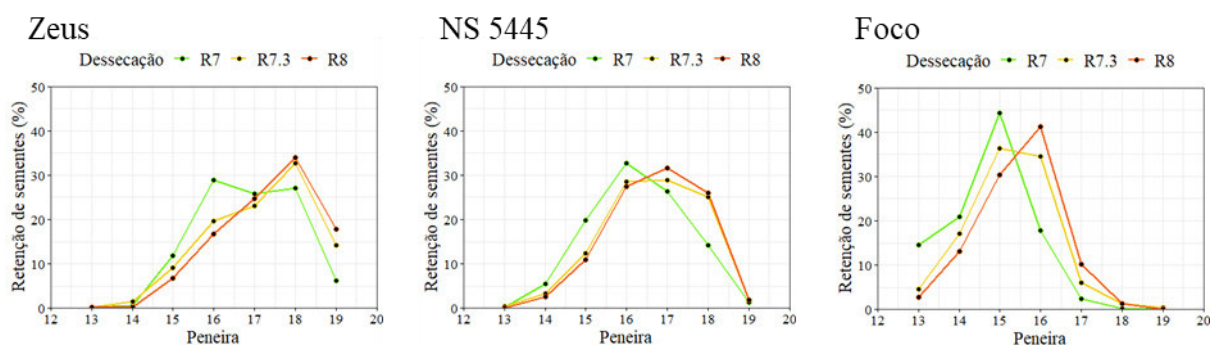


Figura 3. Porcentagens de sementes retidas nas peneiras 13 a 19 (diâmetro: 5,16 a 7,54 mm). Dessecação em R7, R7.3 e colheita em R8 sem dessecação.

### 3.3. Características fisiológicas das sementes

O grau de umidade das sementes ficou na faixa de 10% a 12% até 4 meses de armazenamento. Após 8 meses de armazenamento, as sementes de todos os tratamentos atingiram umidade próxima a 8%. A fim de evitar danos por embebição rápida durante os testes de qualidade as sementes foram submetidas ao pré-condicionamento. Após a colheita, todas as sementes, independentemente do genótipo e do estágio de dessecação, apresentaram germinação mínima para comercialização (> 80 %). Depois de quatro e oito meses de armazenamento, o percentual de germinação reduziu e foi possível observar diferenças entre os estádios de dessecação (Tabela 3). O potencial de germinação das sementes do cultivar Zeus após 8 meses de armazenamento apresentou redução de até 31 pontos percentuais em dessecações realizadas nas plantas no estágio R7, R7.3 e 27 pontos percentuais em R8 sem

dessecação, respectivamente. Ao contrário, os cultivares NS 5445 e Foco tiveram redução na germinação de 9 e 7 pontos percentuais, respectivamente.

O cultivar Zeus teve maior porcentagem de germinação para as sementes colhidas em R8, seguido pelas sementes desseçadas em R7.3 e R7. Em geral, essa diferença se manteve até os oito meses de armazenamento, porém foi observada queda na germinação das sementes ao longo do armazenamento. Já o cultivar NS 5445 apresentou sementes com maior porcentagem de germinação ao longo do armazenamento quando foram desseçadas no estágio R7.3. Para o cultivar Foco, as maiores porcentagens de germinação foram observadas nas sementes desseçadas nos estádios R7 e R7.3.

Tabela 3. Germinação de sementes de soja de diferentes cultivares desseçadas nos estádios de maturação R7, R7.3 e R8, e armazenadas por oito meses.

Cultivar	Armazenamento	Estádio de Dessecação (%)			Média
		R7	R7.3	R8	
Zeus	0 meses	81 Ac	87 Ab	93 Aa	87
	4 meses	85 Aab	81 Bb	88 Aa	85
	8 meses	50 Bc	56 Cb	66 Ba	52
	Média	72	75	82	3,5* e 4,0**
NS 5445	0 meses	94	96	90	93 A
	4 meses	84	91	91	89 B
	8 meses	79	89	84	84 C
	Média	86 b	92 a	88 b	3,0* e 4,3**
Foco	0 meses	88	85	79	84 A
	4 meses	90	87	78	85 A
	8 meses	86	75	71	77 B
	Média	88 a	82 a	76 b	6,3* e 3,9**

Médias seguidas de letras minúsculas na linha e letras maiúsculas na coluna, não diferem a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Coeficiente de variação: (1)\* e (2)\*\*.

Pela PCA, pode-se observar que após oito meses de armazenamento as sementes de todos os tratamentos que apresentaram baixo vigor (Zeus: R7, R7.3 e R8; NS 5445: R7 e R8; Foco: R7.3 e R8) precisaram de mais tempo para germinar, estando localizadas no sentido dos vetores do TMG e T50, e reorganizar as membranas celulares na fase de embebição, ficando no sentido do vetor de CE (Figura 4). Já os tratamentos de alto vigor após a colheita (Zeus: R7.3 e R8; NS 5445: R7.3 e R8; Foco: R7 e R7.3) e após quatro meses de armazenamento

(Zeus: R7.3 e R8; NS 5445: R7.3 e R8; Foco: R7) apresentaram maiores velocidades de germinação (IVE, PCG e CVG), altas porcentagens de germinação (G), maior vigor (EA) e plântulas normais maiores (IC, CP e MSP) (Figura 4).

Considerando os vetores que têm correlação com a maior qualidade das sementes na PCA, é possível perceber a redução do vigor das sementes ao longo de oito meses de armazenamento. Considerando isso, as sementes dos cultivares Zeus e NS 5445 apresentaram a seguinte ordem decrescente de vigor: colheita (0 meses), 4 meses e 8 meses de armazenamento; já para o cultivar Foco, as sementes apresentaram vigor semelhante com 4 e 8 meses de armazenamento (Figura 4). Sementes dessecadas no estádio R7.3 e as colhidas no estádio R8 sem dessecação apresentaram maior vigor nos cultivares Zeus e NS 5445 (Figura 4). Por outro lado, o cultivar Foco produziu sementes de maior vigor quando foram dessecadas no estádio R7 (Figura 4).

O agrupamento dos tratamentos por meio da análise hierárquica está apresentado na forma de dendrograma, o que permitiu identificar a similaridade entre os tratamentos para classificá-los em níveis de vigor de acordo com os parâmetros matemáticos propostos na PCA (Figura 4). Para o cultivar Zeus, observa-se redução do vigor das sementes de todos os tratamentos após o armazenamento. Contudo, diferenças de vigor entre os estádios de dessecação foram notados. Até quatro meses de armazenamento, sementes dessecadas no estádio R7.3 e colhidas no estádio R8 sem dessecação apresentaram vigor superior à dessecação realizada no estádio R7. Aos oito meses de armazenamento, as sementes colhidas em R8 sem dessecação apresentaram maior vigor. Análises de tetrazólio confirmaram essa classificação (Figura 4). Similarmente, o cultivar NS 5445 apresentou sementes de alto vigor quando as plantas foram dessecadas no estádio R7.3 e colhidas em R8 sem dessecação durante todo o período de armazenamento. Já as sementes dessecadas no estádio R7 tiveram o menor vigor durante todo período armazenado. Esse resultado também foi identificado na análise de tetrazólio (Figura 4).

De maneira inversa, o cultivar Foco apresentou sementes de alto vigor quando foram dessecadas no estádio R7 (Figura 4). Os demais tratamentos produziram sementes com qualidade semelhante apenas nas análises realizadas quando recém-colhidas. Aos 4 e 8 meses de armazenamento, as sementes dessecadas no estádio R7.3 e colhidas em R8 sem dessecação apresentaram baixo vigor. Análises de tetrazólio também indicam a mesma classificação.

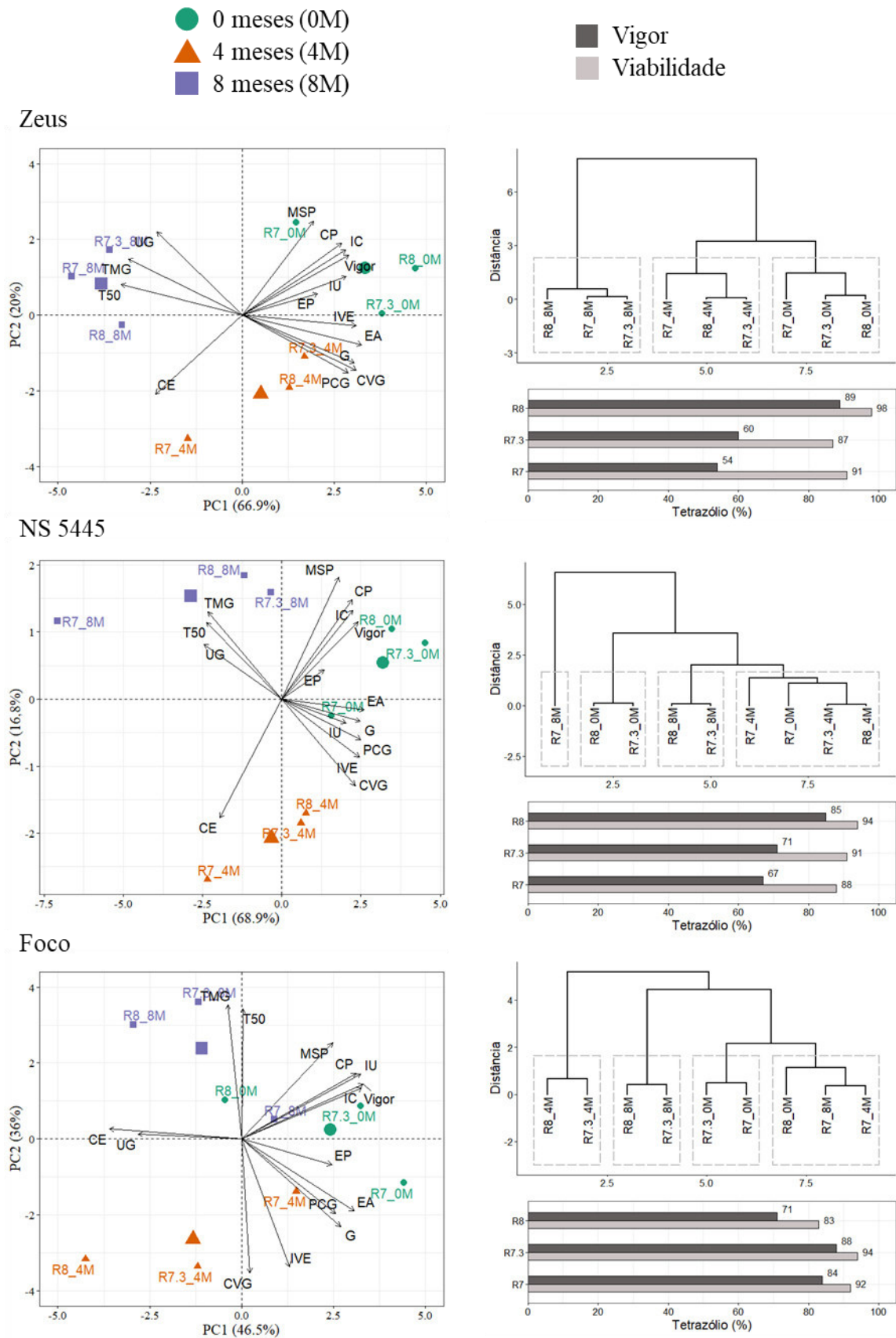


Figura 4. Vigor de sementes de soja de diferentes cultivares dessecadas nos estádios de maturação R7, R7.3 e R8, e armazenadas por oito meses. Análise de componentes principais

(PCA), agrupamento de similaridade de tratamento (dendrograma) e tetrazólio (%). R7, R7.3 e colheita em R8 sem dessecação.

### **3.4. Redes neurais para reconhecimento de padrões**

Definido o vigor das sementes ao longo do armazenamento, pode-se indicar que a qualidade das sementes obtidas de plantas dessecadas varia com o genótipo e ambiente. Assim, aos oito meses de armazenamento foi classificado o momento de dessecação ideal das plantas para obtenção de sementes de alta qualidade (Figura 5). O cultivar Zeus apresentou sementes de maior qualidade fisiológica quando foram colhidas de plantas no estágio R8 sem dessecação. Para o cultivar NS 5445, as sementes de maior qualidade fisiológica foram produzidas de plantas dessecadas no estágio R7.3 ou colhidas em R8. Já o cultivar Foco, as sementes de maior qualidade fisiológica foram produzidas de plantas dessecadas no estágio R7.

Mesmo em vista da complexidade analítica dos dados laboratoriais e suas correlações com os fatores de produção, os modelos de redes neurais artificiais foram capazes de reconhecer níveis de vigor das sementes. A acurácia atingida pelas redes para prever o vigor das sementes dessecadas nos estádios R7 e R7.3 e colhidas em R8 sem dessecação foi de 100% (Figura 5). Os modelos foram criados para classificar os lotes quanto ao vigor das sementes dessecadas caso a caso, ou seja, identificando o cultivar, as condições de colheita e produção. Assim, os modelos foram capazes de prever o vigor das sementes também de acordo com o histórico das sementes ao longo de oito meses de armazenamento. Os ajustes de hiperparâmetros mostraram que redes com 32 neurônios e 50 ciclos foram eficazes para determinar os lotes de sementes classificados como de alta qualidade (Figura 5). Os padrões de classificação da qualidade das sementes dessecadas, após 8 meses de armazenamento, permitiram 100% de acurácia mesmo com as diferentes combinações dos hiperparâmetros (Figura 5). Além disso, a configuração mais eficiente é a que permite menor perda de aprendizagem utilizando a função que diminui o super ajuste dos dados 0,2 e 0,5 (Figura 5). Dessa forma, a performance das redes neurais permitiu classificar o vigor das sementes de plantas dessecadas em diferentes estádios de maturação, cultivares, ambiente e ao longo de oito meses de armazenamento.

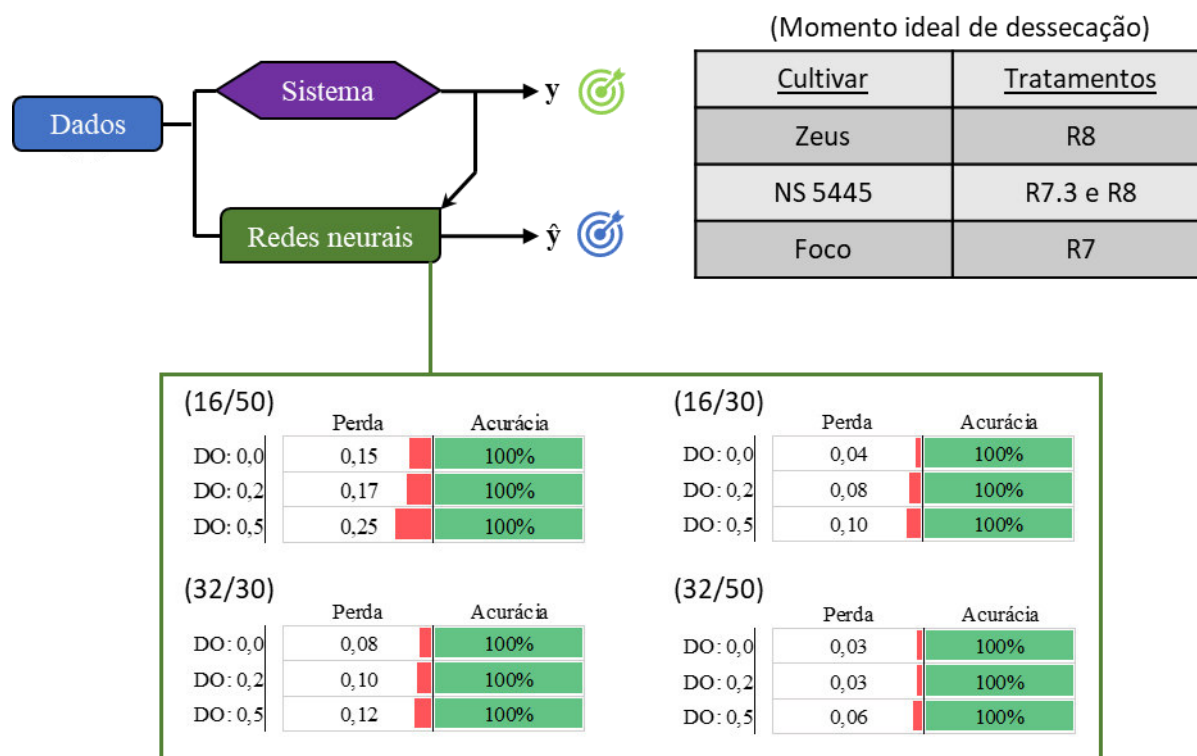


Figura 5. Acurácia e perda para os dados de validação de modelos de redes neurais artificiais para classificação de lotes de sementes dessecadas. Estádios de dessecação R7, R7.3 e colheita em R8 sem dessecação. (Neurônio/ciclos). DO: DropOut.

#### 4. DISCUSSÃO

Os resultados sugerem que dessecações antecipadas nos estádios R7 e R7.3 levam à formação de sementes com características heterogêneas de coloração, geometria e qualidade fisiológica. Essas diferenças foram mais evidentes quando a dessecação foi realizada no estádio R7. Além disso, o armazenamento por oito meses evidenciou que a dessecação nos estádios R7 e R7.3 interferem na qualidade fisiológica das sementes dependendo do cultivar e ambiente de produção. Apesar da complexidade em relacionar as análises de vigor e as características de produção, o processamento de dados por meio de redes neurais pode reconhecer os níveis de qualidade das sementes. Contudo, é importante considerar o tamanho do banco de dados e como ele deve ser adequado a respostas para evitar erros na tomada de decisão de um sistema que tem a proposta de ser automatizado.

Em geral, a qualidade fisiológica máxima das sementes é alcançada na maturidade fisiológica, quando ocorre o máximo acúmulo de matéria seca, que na soja é caracterizada pelo

estádio R7. É nesse momento que as sementes se desligam fisiologicamente da planta mãe, encerrando a translocação de fotoassimilados (Finch-Savage e Bassel, 2016). Em vista disso, as colheitas deveriam ser feitas na maturidade fisiológica, com a finalidade de obter sementes de maior qualidade. Porém, quando as sementes atingem este ponto, as plantas de soja ainda estão com excesso de umidade e grande volume foliar. Isso inviabiliza a colheita mecanizada, além de trazer diversos danos mecânicos às sementes (Bezerra *et al.*, 2016). Portanto, esperar até a senescência das plantas, ou seja, maturação de campo (R8) pode não ser a melhor estratégia para se colher sementes de boa qualidade, tendo em vista que as sementes ficam expostas a eventos bióticos e abióticos por longos períodos (Vergara *et al.*, 2019).

As sementes armazenadas em campo estão sujeitas a ataque de pragas, patógenos e fortes variações de umidade, sendo esse último o principal fator responsável pela redução de qualidade de lotes de sementes de soja. Então, considerando a desuniformidade de maturação das sementes de soja de cultivares com o tipo indeterminado de crescimento, altas temperaturas e oscilações de umidade, teremos impactos severos na qualidade das sementes, conforme foi observado. Vergara *et al.* (2019) aponta que esses impactos levam à redução da qualidade fisiológica das sementes, tanto no momento da colheita como após o armazenamento. Vale ressaltar, que a combinação desses fatores intensifica os processos de respiração consumindo as reservas, aumentando a peroxidação de lipídios, causando danos celulares, diminuindo a qualidade das sementes até a inibição completa da germinação (Ebone *et al.*, 2019).

A fim de contornar esses problemas e evitar a perda de qualidade das sementes uma opção é a utilização de produto químico dessecante. Essa técnica permite colheitas de sementes próximo à maturidade fisiológica e reduz o tempo de exposição das sementes aos eventos bióticos e abióticos (Bezerra *et al.*, 2016). Além disso, a dessecação proporciona outras vantagens como a rápida secagem das plantas, desfolha, controle de plantas daninhas e padronização do campo, o que viabiliza a colheita antecipada (Bezerra *et al.*, 2016). Essa técnica é muito utilizada nos sistemas de produção de grãos, mas para produção de sementes algumas questões ainda são discutidas. A principal delas é o momento da aplicação do dessecante, em seguida, a sua influência em cultivares de soja com o tipo indeterminado de crescimento (Bezerra *et al.*, 2016; Szarecki *et al.*, 2016; De Araújo *et al.*, 2018; Zuffo *et al.*, 2019).

Alguns trabalhos também verificaram a redução no tamanho das sementes em até 18%, quando a dessecação foi feita no estágio de maturação R7. Isso indica que grande parte das sementes não atingiram a maturidade fisiológica, interrompendo o máximo acúmulo de reservas na semente e reduzindo o seu tamanho (Bezerra *et al.*, 2016; Zanatta *et al.*, 2018). A diferença de tamanho tem importantes efeitos no vigor inicial das plântulas, uma vez que em sementes com maior acúmulo de reservas o desenvolvimento do eixo embrionário e da futura plântula é maior. Em outras palavras, o máximo acúmulo de reservas potencializa o estabelecimento das plântulas e permite melhor performance em condições ambientais desfavoráveis (Finch-Savage e Bassel, 2016).

Dessecações em estádios que antecedem a maturidade fisiológica também vão levar a várias outras alterações importantes como a redução da produção e peso das sementes de soja (Bezerra *et al.*, 2016). Essas reduções também foram notadas nesse trabalho, mas no estágio R7, ou seja, na maturidade fisiológica (Tabela 2). Assim, observamos que dessecações realizadas na maturidade fisiológica das sementes podem levar à redução na produtividade e menor acúmulo de matéria seca nas sementes. Segundo Zanatta *et al.* (2018), o uso de dessechantes na fase de divisão celular, expansão, deposição de reservas pode interferir na mobilização dessas reservas, diminuindo a massa, produtividade e a qualidade fisiológica das sementes. Vale ressaltar que a dessecação acelera a senescência das plantas de maneira muito drástica. Isso gera outro problema importante para qualidade de sementes que é o acúmulo de sementes esverdeadas. A dessecação acelera a translocação das reservas e reduz taxas fotossintéticas impedindo a degradação completa da clorofila, o que resulta na manutenção da cor verde nas sementes (França Neto *et al.*, 2012).

De maneira geral, lotes de sementes de soja com percentuais superiores a 10% de sementes com coloração verde podem apresentar problemas de qualidade fisiológica (França Neto *et al.*, 2012). A alta incidência de sementes verdes nos cultivares Zeus e NS 5445 pode ser um dos principais fatores que levaram à redução de qualidade das sementes dessecadas no estágio R7. Quando Bezerra *et al.* (2016) realizaram dessecações em estádios de maturação anteriores a R7.3 também observaram aumento na porcentagem de sementes verdes. Zanatta *et al.* (2018) também relataram diferenças de diâmetro das sementes dessecadas em R7.1. Esses autores atribuíram essas diferenças à desuniformidade de maturação das sementes na planta e no campo. Ou seja, algumas sementes não alcançaram o máximo acúmulo de matéria seca. Já

as sementes dessecadas em R7.3 e R8 tiveram maior peso, diâmetro e produtividade (Tabela 2 e Figura 3).

Diante da desuniformidade nas características físicas e fisiológicas nas sementes, a definição do melhor momento de dessecação é difícil e complexa. Dessa maneira, a dessecação é uma alternativa para colheita de sementes de alta qualidade, mas vai depender do cultivar, princípio ativo, época de aplicação e ausência de chuva na pré-colheita (Pereira *et al.*, 2015). É possível encontrar diferentes resultados quanto ao momento da dessecação. Pereira *et al.* (2015) indicaram no seu estudo que dessecações no estágio R7.1 podem proporcionar sementes com melhor viabilidade e vigor. Zuffo *et al.* (2019) dessecaram as plantas em R7.1 e colheram em três épocas 0, 7 e 14 dias após R8. Esses autores observaram sementes de alta qualidade no estágio R8 + 7 dias. E sementes de baixa qualidade no estágio R8 + 14 dias. Já Zanatta *et al.* (2018) relatam que dessecação em R7.1 e R7.3 não afeta a produção, peso de mil sementes e atributos físicos. No entanto, dessecações nesses estádios levam à redução no vigor das sementes. Por outro lado, Bezerra *et al.* (2016) observou que no estágio R7.3 a produção e o vigor das sementes não foram alterados quando comparado ao estágio R8. Em relação a esses estudos e os resultados deste trabalho, notamos que a qualidade das sementes dessecadas varia, impedindo uma definição geral.

Por outro lado, é possível identificar o estágio ideal para aplicação de dessecantes, uma vez que as plantas dessecadas produzam sementes que mantenham a sua qualidade ao longo do armazenamento. A qualidade fisiológica das sementes é identificada a partir de testes em laboratório e que em associação podem levar a diferentes estratégias quanto ao destino das sementes, a fim de estabelecer lavouras em diversos ambientes de produção. Na indústria sementeira, a qualidade das sementes é identificada como um fator que impacta diretamente o estabelecimento e produtividade das lavouras (Finch-Savage e Bassel, 2016). Dessa maneira, a qualidade das sementes é definida por uma série de análises que atestam a sua capacidade de germinar em relação a diversidade de estresse no campo (Finch-Savage e Bassel, 2016).

Contudo, determinar a qualidade fisiológica dessas sementes a partir de conceitos de associações e grande volume de dados não é uma tarefa fácil. Outros métodos vêm sendo adotados para diminuir a deficiência e complexidade de interpretações. O crescente avanço da visão computacional permitiu por meio de algoritmos revoluções em várias áreas da ciência. Considerando o grande acúmulo de dados e de padrões muitas vezes complexos de serem

compreendidos, o aprendizado de máquina tornou-se também uma poderosa ferramenta na área de análise de sementes. (Medeiros et al., 2021; 2020a; 2020b; Benedet et al., 2020; Andrade et al., 2020; Kusumaningrum et al., 2018; Borràs et al., 2015).

Com alta acurácia na classificação da qualidade, eles também podem permitir uma avaliação confiável e eficiente em larga escala. Além disso, a utilização de redes neurais reduz a dependência de especialistas humanos, pois o modelo aprende a partir dos dados (Zayegh e Al Bassam, 2018). Sua adaptabilidade a diferentes estádios de maturação e condições de cultivo torna-os versáteis, e seu potencial de otimização de processos de seleção e triagem de sementes podem economizar tempo e recursos. Os benefícios podem se estender além da soja, podendo ser aplicados em outras espécies vegetais, contribuindo para a melhoria da produção agrícola por meio de informações precisas sobre a qualidade das sementes (Medeiros et al., 2021; 2020a; 2020b; Benedet et al., 2020; Andrade et al., 2020; Kusumaningrum et al., 2018; Borràs et al., 2015). Esse trabalho aplica o conhecimento de um especialista em análises de qualidade de sementes no processo de reconhecimento de padrões para aprendizagem de máquina. Contudo, esses métodos de aprendizagem não têm como objetivo substituir especialistas da área, mas contribuem em vários sentidos na pesquisa e desenvolvimento de mercado, conforme observado neste estudo.

## 5. CONCLUSÕES

Sementes de soja apresentam características físicas e fisiológicas com ampla desuniformidade quando dessecadas no estádio R7. A dessecação nesse estádio leva à produção de sementes menores, com menor acúmulo de matéria seca, coloração e formato heterogêneo e alta incidência de sementes verdes.

Além disso, o vigor das sementes de soja dessecadas varia com o genótipo e ambiente de produção. Nas condições em que as sementes foram produzidas, o cultivar Zeus produz sementes de maior qualidade quando colhidas em R8 sem dessecação. Para o cultivar NS 5445, sementes de alta qualidade são produzidas de plantas dessecadas no estádio R7.3 ou colhidas em R8. Já o cultivar Foco, a dessecação de plantas no estádio R7 induz à produção de sementes de maior qualidade.

As redes neurais artificiais com 100% de acurácia classifica a qualidade de sementes dessecadas nos estádios de maturação R7, R7.3 e colhidas em R8 sem dessecação.

## REFERÊNCIAS

- Andrade, G.C., Medeiros Coelho, C.M. and Uarrota, V.G. (2020) Modelling the vigour of maize seeds submitted to artificial accelerated ageing based on ATR-FTIR data and chemometric tools (PCA, HCA and PLS-DA). *Heliyon*, **6**, e03477. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03477>
- De Araújo, D.L., Lazzari, M.P., Dutra, R., Lajús, C.R., Klein, C., Cericato, A., Sordi, A. and Junges, M. (2018) Influence of soybean desiccation periods on its germination potential and yield components. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, **13**, 1–6. <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i4a5584>
- Benedet, L., Faria, W.M., Silva, S.H.G., Mancini, M., Guilherme, L.R.G., Demattê, J.A.M. and Curi, N. (2020) Soil subgroup prediction via portable X-ray fluorescence and visible near-infrared spectroscopy. *Geoderma*, **365**, 114212. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114212>
- Bezerra, A.R.G., Sedyama, T., Borém, A. and Soares, M.M. (2015) Importância Econômica. In *Soja: do Plantio a Colheita* (eds. T. Sedyama, F. Silva & Aluizio Borém), pp. 9–26, UFV, Viçosa, MG.
- Bezerra, A.R.G., Sedyama, T., Cruz, C.D., Dos Santos Silva, F.C., Da Silva, A.F., Rosa, D.P. and Dos Santos Dias, L.A. (2016) Productivity and quality of soybean seeds of determinate and indeterminate growth types desiccated in pre-harvest. *Australian Journal of Crop Science*, **10**, 693–700. <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.05.p7421>
- Borràs, E., Ferré, J., Boqué, R., Mestres, M., Aceña, L. and Busto, O. (2015) Data fusion methodologies for food and beverage authentication and quality assessment - A review. *Analytica Chimica Acta*, **891**, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.04.042>
- BRASIL. (2009) *Regras Para Análise de Semente.*, Primeira (ed Secretaria de Defesa Agropecuária). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília.
- Carvalho, N.M. de and Nakagawa, J. (2012) *Sementes: Ciência, Tecnologia e Produção.*, 5<sup>o</sup> (ed Funep).
- Chollet, F. (2020) Structured data classification from scratch. URL [https://keras.io/examples/structured\\_data/structured\\_data\\_classification\\_from\\_scratch/](https://keras.io/examples/structured_data/structured_data_classification_from_scratch/) [accessed 20 July 2021]
- CONAB. (2021) *Acompanhamento Da Safra Brasileira de Grãos*. Brasília DF.
- Daltro, E.M.F., Albuquerque, M.C. de F. e, França Neto, J. de B., Guimarães, S.C., Gazziero, D.L.P. and Henning, A.A. (2010) Aplicação de dessecantes em pré-colheita: efeito na

- qualidade fisiológica de sementes de soja. *Revista Brasileira de Sementes*, **32**, 111–122.  
<https://doi.org/10.1590/s0101-31222010000100013>
- Ebone, L.A., Caverzan, A. and Chavarria, G. (2019) Physiologic alterations in orthodox seeds due to deterioration processes. *Plant Physiology and Biochemistry*, **145**, 34–42.  
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.10.028>
- EMBRAPA. (2020) Distribuição vertical da composição química e da uniformidade no tamanho de grãos em plantas de soja de tipo de crescimento determinado e indeterminado. *Boletim de pesquisa e desenvolvimento*, 1–32.
- Fehr, W.R. and Caviness, C.E. (1977) Stages of Soybean Development. *Special report*, **80**, 11.
- Fialho, C.A., Dias, D.C.F. dos S., Pinheiro, D.T., Oliveira, A.M.S., Soares, T.F.S.N. and Silva, L.J. da. (2022) Antioxidant and physiological responses of seeds of soybean cultivars to delayed harvest. *Semina: Ciências Agrárias*, **43**, 1127–1144.  
<https://doi.org/10.5433/1679-0359.2022v43n3p1127>
- Finch-Savage, W.E. and Bassel, G.W. (2016) Seed vigour and crop establishment: Extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, **67**, 567–591.  
<https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>
- Flores, M.F., Panobianco, M. and Konflanz, V.A. (2016) Qualidade fisiológica e rendimento de sementes de soja em função do hábito de crescimento da planta. Universidade Federal do Paraná.
- FRANÇA-NETO, J., KRZYZANOWSKI, F., HENNING, A. and LORINI, I. (2012) Semente esverdeada de soja: causas e efeitos sobre o desempenho fisiológico - Série Sementes. *Circular Técnica-Embrapa soja*, 1–16.
- França Neto, J.B., Krzyzanowski, F.C. and Costa, N.P. da. (1999) Metodologia do teste de tetrazólio em sementes de soja. In *Vigor de Sementes: Conceitos e Testes* (eds. F.C. Krzyzanowski, R.D. Vieira & J. de B. França Neto), p. 218, ABRATES, Londrina, PR.
- Goldberg, R.B., Paiva, G. de and Yadegari, R. (1994) Plant Embriogenesis: Zygote to Seed. *Science*, **266**, 605–614.
- Hurburgh, C.R. (1994) Long-term soybean composition patterns and their effect on processing. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, **71**, 1425–1427.  
<https://doi.org/10.1007/BF02541367>
- IBGE. (2021) Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. URL <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html?=&t=o-que-e> [accessed 18 October

2021]

- INMET, I. de meteorologia. (2023) Instituto de meteorologia (INMET).URL <https://portal.inmet.gov.br/>
- Kumar, S.P.J., Rajendra Prasad, S.R., Banerjee, R. and Thammineni, C. (2015) Seed birth to death: Dual functions of reactive oxygen species in seed physiology. *Annals of Botany*, **116**, 663–668. <https://doi.org/10.1093/aob/mcv098>
- Kurek, K., Plitta-Michalak, B. and Ratajczak, E. (2019) Reactive oxygen species as potential drivers of the seed aging process. *Plants*, **8**, 1–13. <https://doi.org/10.3390/plants8060174>
- Kusumaningrum, D., Lee, H., Lohumi, S., Mo, C., Kim, M.S. and Cho, B.K. (2018) Non-destructive technique for determining the viability of soybean (*Glycine max*) seeds using FT-NIR spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **98**, 1734–1742. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8646>
- Marcos Filho, J. (1999) Teste de envelhecimento acelerado. In *Vigor de Sementes: Conceitos e Testes* (eds. F.C. Krzyzanowski, R.D. Vieira & J. de B. França Neto), p. 218, ABRATES, Londrina, PR.
- Marcos Filho, J. (2015) *Fisiologia de Sementes de Plantas Cultivadas.*, 2nd ed. Abrates, Londrina.
- de Medeiros, A.D., Bernardes, R.C., da Silva, L.J., de Freitas, B.A.L., Dias, D.C.F. dos S. and da Silva, C.B. (2021) Deep learning-based approach using X-ray images for classifying *Crambe abyssinica* seed quality. *Industrial Crops and Products*, **164**. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113378>
- de Medeiros, A.D., Capobianco, N.P., da Silva, J.M., da Silva, L.J., da Silva, C.B. and dos Santos Dias, D.C.F. (2020a) Interactive machine learning for soybean seed and seedling quality classification. *Scientific Reports*, **10**, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68273-y>
- de Medeiros, A.D., da Silva, L.J., Ribeiro, J.P.O., Ferreira, K.C., Rosas, J.T.F., Santos, A.A. and da Silva, C.B. (2020b) Machine learning for seed quality classification: An advanced approach using merger data from FT-NIR spectroscopy and x-ray imaging. *Sensors (Switzerland)*, **20**, 1–12. <https://doi.org/10.3390/s20154319>
- Mittler, R. (2017) ROS Are Good. *Trends in Plant Science*, **22**, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>
- Nakagawa, J. (1999) Testes de Vigor Baseados no Desempenho das Plântulas. In *Vigor de Sementes: Conceitos e Testes* (eds. F.C. Krzyzanowski, R.D. Vieira, & J. de B.F. Neto),

- p. 218, ABRATES, Londrina, PR.
- Noctor, G., Reichheld, J.P. and Foyer, C.H. (2018) ROS-related redox regulation and signaling in plants. *Seminars in Cell and Developmental Biology*, **80**, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2017.07.013>
- Pereira, T., Coelho, C.M.M., Sobiecki, M. and Souza, C.A. (2015) Qualidade fisiológica de sementes de soja em função da dessecação pré-colheita. *Planta Daninha*, **33**, 441–450. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582015000300007>
- Pinheiro, D.T., Dias, D.C.F. dos S., de Medeiros, A.D., Ribeiro, J.P.O., da Silva, F.L. and da Silva, L.J. (2021) Weathering deterioration in pre-harvest of soybean seeds: Physiological, physical, and morpho-anatomical changes. *Scientia Agricola*, **78**. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2020-0166>
- Rajjou, L. and Debeaujon, I. (2008) Seed longevity: Survival and maintenance of high germination ability of dry seeds. *Comptes Rendus - Biologies*, **331**, 796–805. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2008.07.021>
- Rodrigues, M., Gomes-Junior, F.G. and Marcos-Filho, J. (2020) Vigor-S: System for Automated Analysis of Soybean Seed Vigor. *Journal of Seed Science*, **42**, 1–12.
- Sahu, B., Sahu, A.K., Thomas, V. and Naithani, S.C. (2017) Reactive oxygen species, lipid peroxidation, protein oxidation and antioxidative enzymes in dehydrating Karanj (*Pongamia pinnata*) seeds during storage. *South African Journal of Botany*, **112**, 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.06.030>
- Sano, N., Rajjou, L., North, H.M., Debeaujon, I., Marion-Poll, A. and Seo, M. (2016) Staying alive: Molecular aspects of seed longevity. *Plant and Cell Physiology*, **57**, 660–674. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcv186>
- Santos, C.M.R., Menezes, N.L. de and Villela, F.A. (2004) Alterações Fisiológicas E Bioquímicas Em Sementes De Feijão envelhecidas artificialmente. *Revista Brasileira de Sementes*, **26**, 110–119. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222004000100017>
- Sediyama, T., Silva, F. and Borém, A. (2015) *Soja: Do Plantio à Colheita*. (eds T Sediyama, F Silva, and A Borém). UFV, Viçosa, MG.
- Silva, L.J. da, Medeiros, A.D. de and Oliveira, A.M.S. (2019) SeedCalc, a new automated R software tool for germination and seedling length data processing. *Journal of Seed Science*, **41**, 250–257. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v42n2217267>
- Souza, T.R., Araujo, M.E.V., Teixeira, I.R., Guerrero, M.C., Neto, S.P.S. and Corrêa, P.C. (2020) Physiological quality of conventional soybean cultivars of seeds as a function of

- pod position in plant canopy. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, **32**, 336–344. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2020.v32.i5.2100>
- Szareski, J., Zanatta, E., Koch, F., Aisenberg, G.R., Demari, H., Kehl, K., Pimentel, J.R., Carvalho, I.R., Nardino, M., Trombeta, H.W., Souza, V.Q. De, Garbin, E., Pedó, T. and Aumonde, T.Z. (2016) Pre-harvest desiccation and seed production in soybean crops harvest desiccation and seed production in soybean crops.
- Vergara, R., da Silva, R.N.O., Nadal, A.P., Gadotti, G.I., Aumonde, T.Z. and Villela, F.A. (2019) Harvest delay, storage and physiological quality of soybean seeds. *Journal of Seed Science*, **41**, 506–513. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v41n4222413>
- Vieira, R.D. and Krzyzanowski, F.C. (1999) Teste de condutividade elétrica. In *Vigor de Sementes: Conceitos e Testes* (eds. F.C. Krzyzanowski, R.D. Vieira & J. de B. França Neto), p. 218, ABRATES, Londrina, PR.
- Weerasekara, I., Sinniah, U.R., Namasivayam, P., Nazli, M.H., Abdurahman, S.A. and Ghazali, M.N. (2021) The influence of seed production environment on seed development and quality of soybean (*Glycine max* (L.) merrill). *Agronomy*, **11**. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071430>
- Yin, G., Xin, X., Song, C., Chen, X., Zhang, J., Wu, S., Li, R., Liu, X. and Lu, X. (2014) Activity levels and expression of antioxidant enzymes in the ascorbate-glutathione cycle in artificially aged rice seed. *Plant Physiology and Biochemistry*, **80**, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.03.006>
- Zanatta, E., Szareski, V.J., Carvalho, I.R., Koch, F., Pimentel, J.R., Troyjack, C., Dellagostin, S.M., Demari, G.H., Lautenchleger, F., Souza, V.Q. de, Martinazzo, E.G., Villela, F.A., Pedó, T. and Aumonde, T.Z. (2018) Pre-harvest Desiccation: Productivity and Physical and Physiological Inferences on Soybean Seeds During Storage. *Journal of Agricultural Science*, **10**, 354. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n6p354>
- Zanon, A.J., Streck, N.A., da Rocha, T.S.M., Alberto, C.M., Bartz, A.C., de Paula, G.M., Tomiozzo, R., da Costa, L.C., Fensterseifer, C.A., Tagliapietra, E.L., Cardoso, Â.P., Weber, P.S. and Bexaira, K.P. (2016) Growth habit effect on development of modern soybean cultivars after beginning of bloom in Rio Grande do Sul. *Bragantia*, **75**, 446–458. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.535>
- Zayegh, A. and Al Bassam, N. (2018) Neural Network Principles and Applications. *Digital Systems*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80416>
- Zuffo, A.M., Aguilera, J.G., Carvalho, E.R. and Teodoro, P.E. (2020) Harvest times with

chemical desiccation and the effects on the enzymatic expression and physiological quality of soybean seeds. *Revista Caatinga*, **33**, 361–370. <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n209rc>

Zuffo, A.M., Santos, M.D.A. Dos, de Oliveira, I.C., Alves, C.Z., Aguilera, J.G. and Teodoro, P.E. (2019) Does chemical desiccation and harvest time affect the physiological and sanitary quality of soybean seeds? *Revista Caatinga*, **32**, 934–942. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n409rc>

Zuffo, A.M., Zuffo Júnior, J.M., Zambiazzi, E.V. and Steiner, F. (2017) Physiological and sanitary quality of soybean seeds harvested at different periods and submitted to storage1. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, **47**, 312–320. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4747576>

## **CAPÍTULO II**

### **QUALIDADE FISIOLÓGICA E ATIVIDADE ENZIMÁTICA EM SEMENTES DE SOJA DESSECADAS EM DIFERENTES ESTÁDIOS DE MATURAÇÃO E ARMAZENADAS**

## RESUMO

SILVA JÚNIOR, Rubens Alves da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2023. **Qualidade fisiológica e atividade enzimática em sementes de soja dessecadas em diferentes estádios de maturação e armazenadas.** Orientador: Laércio Junio da Silva. Coorientadora: Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias.

As sementes de soja estão sujeitas à deterioração em campo a partir da maturidade fisiológica, e o uso de dessecantes é uma estratégia interessante para reduzir o tempo em que permanecem no campo, expostas às condições climáticas adversas, até alcançarem o ponto ideal de colheita. Para obter sucesso, é possível realizar ajustes na época de dessecação, levando em consideração o estágio de maturação para obter sementes de alta qualidade. Levando isso em consideração, o objetivo do trabalho foi avaliar a qualidade fisiológica e atividade das enzimas antioxidantes em sementes de soja submetidas à dessecação em diferentes estádios de maturação, recém-colhidas e armazenadas. Os tratamentos foram compostos por três cultivares de tipo de crescimento indeterminado e três estádios de dessecação. T1: dessecação das plantas no estágio R7, T2: dessecação no estágio R7.3; e T3: plantas não dessecadas e colhidas no estágio R8. O dessecante utilizado foi o Paraquat na dosagem de 400 g ha<sup>-1</sup> de ingrediente ativo. Após a secagem das plantas, as sementes foram colhidas e trilhadas. As sementes foram armazenadas durante oito meses em ambiente de laboratório (temperatura de 18 °C ± 1,8 e umidade relativa do ar de 65,6 % ± 12,8). A qualidade das sementes foi avaliada inicialmente e a cada quatro meses (0, 4 e 8 meses) por meio de testes de germinação, vigor e atividade das enzimas antioxidantes SOD, CAT, APX e POX. Os dados foram submetidos à análise de variância e comparação de médias, além de análise multivariada de componentes principais e correlação de Pearson. As características fisiológicas e bioquímicas indicaram que a qualidade variou com o cultivar, momento de dessecação e ambiente de produção. O cultivar Zeus produziu sementes de maior qualidade quando colhidas em R8 sem dessecação. O cultivar NS 5445 teve sementes de alta qualidade quando foram colhidas de plantas dessecadas no estágio R7.3 ou colhidas em R8. Já o cultivar Foco, as sementes de maior qualidade foram produzidas com a dessecação realizada no estágio R7. Em relação ao sistema de defesa antioxidativo, houve redução da atividade das enzimas POX aos oito meses de armazenamento, independentemente do estágio de dessecação. As atividades enzimáticas da CAT e APX diferem com o cultivar e apresentam aumento com tratamentos de dessecação que deram origem a sementes de maior qualidade fisiológica após a colheita e armazenamento. A atividade da SOD não apresentou correlação com os testes de qualidade fisiológica em sementes dessecadas.

Palavra-chave: Pré-colheita. Enzimas. Qualidade. Estádio fenológico.

## ABSTRACT

SILVA JÚNIOR, Rubens Alves da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2023. **Physiological quality and enzyme activity in desiccated soybean seeds at different maturation stages and storage.** Advisor: Laércio Junio da Silva. Co-advisor: Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias.

Soybean seeds are subject to deterioration in the field from physiological maturity, and the use of desiccants is an interesting strategy to reduce the time they stay in the field, exposed to adverse weather conditions, until they reach the ideal harvesting point. To achieve success, adjustments in the desiccation timing can be made, considering the maturation stage to obtain high-quality seeds. Taking this into consideration, the objective of this study was to evaluate the physiological quality and activity of antioxidant enzymes in soybean seeds subjected to desiccation at different stages of maturation after harvest and during storage. The treatments consisted of three cultivars of indeterminate growth type and three desiccation stages. T1: desiccation of plants at the R7 stage; T2: desiccation at the R7.3 stage; and T3: non-desiccated plants harvested at the R8 stage. The desiccant used was Paraquat at a dosage of 400 g ha<sup>-1</sup> of active ingredient. After drying, the plants were harvested, threshed, and the seeds stored for eight months in a laboratory environment (temperature of 18 °C ± 1.8 °C and relative humidity of 65.6% ± 12.8%). Seed quality was evaluated initially and every four months (0, 4 and 8 months) through tests of germination, vigor and activity of the antioxidant enzymes SOD, CAT, APX and POX. Data were subjected to analysis of variance, mean comparison, multivariate analysis of principal components, and Pearson's correlation. The physiological and biochemical characteristics indicated that seed quality varied with the cultivar, desiccation timing, and production environment. The Zeus cultivar produced higher-quality seeds when harvested at R8 without desiccation. The NS 5445 cultivar had high-quality seeds when harvested from desiccated plants at the R7.3 stage or when harvested at R8. On the other hand, for the Foco cultivar, the highest-quality seeds were produced with desiccation performed at the R7 stage. Regarding the antioxidant defense system, the activities of POX enzymes decreased at eight months of storage regardless of the desiccation stage. The enzymatic activities of CAT and APX differ among cultivars and show an increase with desiccation treatments, resulting in seeds of higher physiological quality after harvest and storage. The activity of SOD showed no correlation with the physiological quality tests in desiccated seeds.

Keywords: Pre-harvest. Enzymes. Quality. Phenological stage.

## 1. INTRODUÇÃO

A colheita é um dos processos mais importantes na produção de sementes de alta qualidade e dentre os vários aspectos que devemos considerar é o momento ideal de colheita. Na cultura da soja, o ponto de colheita é alcançado quando o campo atinge o estágio R8 de maturação (Sediyama *et al.*, 2015), quando a colheita deve ser feita o mais rápido possível para evitar a exposição das sementes a variações do clima, microrganismos e insetos (Vergara *et al.*, 2019; Fialho *et al.*, 2022). A maturidade fisiológica ocorre no estágio R7 e idealmente seria o melhor momento da colheita, já que é a fase de máximo acúmulo de matéria seca e vigor (Marcos Filho, 2015; Sediyama *et al.*, 2015). Contudo, nesse estágio a colheita é inviável devido ao excesso de umidade das plantas e sementes. Se a colheita for realizada nesse estágio, observaremos problemas no maquinário, baixa eficiência de colheita e altos índices de danos mecânicos nas sementes.

Assim, algumas estratégias podem ser tomadas pelos produtores para obtenção de sementes de alta qualidade. A dessecação das plantas em campo é uma prática realizada na produções de grãos (Bezerra *et al.*, 2016; Szarecki *et al.*, 2016; De Araújo *et al.*, 2018; Zanatta *et al.*, 2018; Zuffo *et al.*, 2019) e que pode ser utilizada também na produção de sementes com os devidos cuidados para preservar a sua qualidade. A ação de produtos químicos dessecantes permite colheitas antes do estágio R8, uma vez que reduz o teor de água, provoca a desfolha das plantas e padroniza o campo para a colheita. Outra vantagem é a antecipação da colheita, que permite maior sucesso no plantio da safrinha. Além disso, dependendo das condições, oferece significativo custos-benefícios aos produtores.

Então, bastaria para o produtor fazer a dessecação das plantas e colher as sementes no seu estágio de maior vigor. Porém, na prática não é o que tem sido observado haja vista as diferentes opções de dessecantes, cultivares e condições climáticas nas diferentes regiões de produção. A primeira desvantagem que podemos observar com a dessecação da soja é a redução de produtividade (Bezerra *et al.*, 2016; De Araújo *et al.*, 2018). Além disso, dessecantes como glifosato, glufosinato de amônio e saflufenacil não são recomendados como métodos para colheita de sementes. Estudos indicam que esses produtos químicos alteram a qualidade fisiológica das sementes de soja (Daltro *et al.*, 2010; De Araújo *et al.*, 2018; Zuffo *et al.*, 2019). A toxicidade destes dessecantes químicos pode provocar várias anomalias nas sementes como atrofia do sistema radicular, produção de sementes verdes, redução no acúmulo de matéria seca,

alterações morfológicas e redução na germinação e vigor (Daltro *et al.*, 2010; De Araújo *et al.*, 2018; Zuffo *et al.*, 2019).

É preciso definir também o momento ideal para a dessecação das plantas havendo diferentes informações na literatura. Por exemplo, Pereira *et al.* (2015) indica que dessecações no estágio R7.1 podem proporcionar sementes com maior viabilidade e vigor. Zuffo *et al.* (2019) dessecaram plantas no estágio R7.1 e colheram em três épocas 0, 7 e 14 dias após R8. Os autores observaram sementes de alta qualidade no estágio R8 + 7 dias e sementes de baixa qualidade no estágio R8 + 14 dias. Já Zanatta *et al.* (2018) relatam que dessecações em R7.1 e R7.3 levam a redução no vigor das sementes. Por outro lado, Bezerra *et al.* (2016) observaram redução de produção e vigor das sementes com dessecações realizadas em R5.7 e R6.5. Enquanto a dessecação em R7.3, a produção e o vigor não foram alterados quando comparado ao estágio R8. De toda forma, métodos que possam contribuir com a manutenção da qualidade fisiológica das sementes, considerando diferentes cultivares e grupos de maturação, são benéficos.

A qualidade de sementes é um fator que impacta diretamente o estabelecimento e a produtividade de diferentes espécies agrícolas (Finch-Savage e Bassel, 2016). Ela é composta por quatro atributos principais, a qualidade física, sanitária, genética e fisiológica. Esses atributos são avaliados por meio de um conjunto de testes que em associação podem indicar estratégias quanto ao destino dos lotes de sementes. A qualidade das sementes permite identificar também a capacidade de lotes de sementes originarem plantas vigorosas que permitam estabelecer estandes satisfatórios e consequentemente campos com alta produtividade. Dentre vários conceitos, o vigor é muito importante, porque atesta a capacidade das sementes germinarem sob condições de estresse em campo.

Devemos destacar também que as sementes perdem qualidade por meio do processo de deterioração, iniciando na maturidade fisiológica até a perda da viabilidade das sementes. Esse processo é um fator biológico natural que corresponde a uma série de mudanças degenerativas, causadas pelo excesso de espécies reativas de oxigênio (EROs), em estruturas físico-químicas responsáveis pela proteção e desenvolvimento normal do embrião (Noctor *et al.*, 2018; Ebone *et al.*, 2019). O excesso de EROs altera ou inviabiliza as funções celulares naturais das sementes, o que resulta em estresse oxidativo, danos e finalmente perda de qualidade (Zuffo *et al.*, 2020; Pinheiro *et al.*, 2020; Fialho *et al.*, 2022). Dentre os principais danos estão a

degradação de lipídeos de membranas, oxidação de proteínas, danos a ácidos nucleicos (DNA e RNA), inibição enzimática e morte celular (Kumar et al., 2015; Ebone et al., 2019). Considerando a prática da dessecação, as sementes também podem tornar-se mais suscetíveis a deterioração por conta desses processos oxidativos, uma vez que a dessecação pode originar sementes com diferentes anomalias, como as sementes esverdeadas, que perdem a viabilidade rapidamente durante o armazenamento (França Neto *et al.*, 2012).

A magnitude dos danos celulares também é influenciada pela capacidade da semente de eliminar as EROs via sistema enzimático e não enzimático. O sistema enzimático antioxidativo é composto por diversas enzimas, destacando-se a superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase de ascorbato (APX) e peroxidase (POX) (Noctor *et al.*, 2018; Ebone et al., 2019; Rajjou e Debeaujon, 2008; Mittler, 2017). Em relação as atividades enzimáticas de sementes dessecadas, Zuffo et al. (2020) também aponta que a expressão das enzimas álcool desidrogenase, esterase e isocitrato liase são eficientes no monitoramento da qualidade fisiológica das sementes. Já a malato desidrogenase e superóxido dismutase apresentaram baixa correlação com os testes fisiológicos. Assim, alterações na atividade das enzimas do sistema antioxidativo pode levar a acúmulos de EROs, levando à perda de vigor das sementes. Portanto, o entendimento da atuação dessas enzimas também é essencial para esclarecer o potencial fisiológico e a variações de qualidade de sementes dessecadas (Yin et al., 2014; Pinheiro et al., 2020; Barros et al., 2021; Fialho et al., 2022).

Diante disso, o objetivo do trabalho é avaliar o efeito da dessecação em diferentes estádios de maturação na qualidade fisiológica e bioquímica de sementes de soja logo após a colheita e durante o armazenamento.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Obtenção de lotes, pré-colheita e condições de armazenamento das sementes**

As sementes de soja foram adquiridas de empresas produtoras de sementes e todos os tratos culturais foram aplicados a nível comercial de produção nas regiões do Cerrado (Rio Verde - GO) e Sul (Toledo - PR) do Brasil. Os lotes de sementes utilizados foram compostos por três cultivares de soja de hábito de crescimento indeterminado, produzidos na safra 2019-2020. Os cultivares Brasmax Zeus IPRO, NS 5445 IPRO (Toledo - PR) e Brasmax Foco IPRO (Rio Verde - GO) foram dessecados em dois estádios de maturação de campo R7 e R7.3. Para

comparação, também foram colhidas sementes de plantas não dessecadas no estádio R8 de cada cultivar. A identificação dos estádios de maturação de campo de produção de soja R7, R7.3 e R8 foram feitas de acordo com Fehr e Caviness (1977). A dessecação foi feita com o produto químico Paraquat na dosagem de 400 g ha<sup>-1</sup> do ingrediente ativo aplicado por meio de pulverizador. Após o efeito do dessecante foi feita a colheita e a trilhagem dos campos de produção. As sementes foram armazenadas em sacos de papel durante oito meses em ambiente refrigerado com temperatura de 18 °C ± 1,8 e umidade relativa do ar de 65,6% ± 12,8. Para determinar a qualidade fisiológica e atividade enzimática foram feitas análises nas sementes logo após a colheita, aos 4 e 8 meses de armazenamento.

## 2.2. Dados meteorológicos

Dados climáticos foram coletados de estações meteorológicas referente ao seguinte período de colheita: 01/01/2020 a 31/03/2020. Foram extraídos dados diários de temperatura máxima/mínima (°C), umidade relativa máxima/mínima (UR%) e precipitação (mm) dos municípios de Rio Verde – GO e Toledo – PR das estações meteorológicas 83470 e S835, respectivamente (INMET, 2023).

## 2.3. Determinação de umidade, testes de germinação e vigor

As análises foram realizadas no Laboratório de Pesquisa de Sementes do Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. Foram avaliados o grau de umidade, germinação e os seguintes testes de vigor:

**Grau de Umidade:** O teor de água das sementes foi determinado pelo método de estufa a 105 °C por 24 h a partir de duas repetições com 50 sementes cada. Os resultados foram expressos em porcentagem (BRASIL, 2009).

**Germinação:** A capacidade das sementes gerarem plântulas normais foi avaliada com quatro repetições de 50 sementes cada. As sementes foram semeadas em rolos de papel Germitest® previamente umedecidos com água destilada no volume de 2,5 vezes o peso do papel seco. Logo após, foram confeccionados rolos e mantidos em germinador tipo Mangelsdorf a 25 °C. Finalmente, no quinto e oitavo dia após a semeadura foi feita a contagem do número de plântulas normais. Os resultados foram expressos em porcentagem (BRASIL, 2009).

**Primeira Contagem de Germinação:** O teste foi feito em conjunto com o teste de germinação. O número de plântulas normais foi contabilizado no quinto dia após a sementeira. Os resultados foram expressos em porcentagem (Nakagawa, 1999).

**Envelhecimento Acelerado:** Amostras de 42 g de sementes de cada lote foram organizadas sobre tela metálica acoplada a caixa tipo Gerbox®, contendo 40 ml de água destilada. Em seguida, as caixas foram levadas para uma câmara tipo BOD e mantidas a 42 °C durante 48 h (Marcos Filho, 1999). Após este período, as sementes foram submetidas ao teste de germinação com quatro repetições de 50 sementes, conforme descrito no teste de germinação. No quinto dia após a montagem do teste foi feita a contagem do número de plântulas normais. Os resultados foram expressos em porcentagem.

**Condutividade Elétrica:** A análise foi feita com quatro repetições de 50 sementes. As sementes foram pesadas e em seguida colocadas em copos plásticos contendo 75 ml de água destilada. Os copos foram mantidos em temperatura constante de 25 °C durante 24 h. Após este período, foram realizadas leituras de condutividade elétrica dos exsudados das sementes por meio de condutivímetro modelo Digmed DM-31. Os resultados foram expressos em  $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$  (Vieira and Krzyzanowski, 1999).

**Emergência de Plântulas:** As sementes foram semeadas em bandejas para preparação de mudas de 200 células. Assim, cada bandeja correspondeu a quatro repetições com 50 sementes. As bandejas foram preenchidas com areia previamente umedecida até a capacidade de campo. Em seguida, as sementes foram semeadas e irrigadas sempre que necessário. Avaliações de plântulas emergidas foram feitas diariamente. Consideramos emergidas as plântulas com os cotilédones acima da superfície do substrato. Os resultados foram expressos em porcentagem de emergência.

**Índice de Velocidade de Emergência:** A contagem diária de plântulas emergidas do teste de emergência foi utilizada para o cálculo do IVG, de acordo com a fórmula proposta por Maguire (1962).

**Comprimento de Plântulas:** O teste foi realizado com quatro repetições de 20 sementes. Assim como descrito no teste de germinação, as sementes foram colocadas para germinar. Contudo, os rolos foram mantidos em germinador tipo Mangelsdorf a 25 °C por três dias até a avaliação por meio de análise de imagens no software Vigor-S. A captura das imagens

e procedimentos de avaliação foi realizado de acordo com Rodrigues (2020) para obtenção do comprimento de plântulas e dos índices de crescimento e vigor.

**Matéria Seca de Plântulas:** O teste foi realizado com quatro repetições de 20 sementes. Assim como descrito no teste de germinação, as sementes foram colocadas para germinar. Contudo, os rolos foram mantidos em germinador tipo Mangelsdorf a 25 °C por cinco dias. As plântulas inteiras sem os cotilédones foram colocadas em sacos de papel tipo Kraft para secagem. O material foi mantido em estufa de circulação de ar forçado, por 72 h, a 65 °C. Após a secagem, o material vegetal foi pesado em balança de precisão (0,001g) para determinação da matéria seca. Os resultados foram expressos em mg plântula<sup>-1</sup>.

**Tetrazólio:** Foi conduzido com duas repetições de 50 sementes após 8 meses de armazenamento. As amostras foram embebidas em papel Germitest® umedecido com volume de água destilada equivalente a 2,5 vezes o peso do papel seco. As sementes permaneceram nestas condições por 16 h a 25 °C. Em seguida, as sementes foram transferidas para copos plásticos contendo solução de sal tetrazólio na concentração de 0,075%. Os copos com as sementes e a solução de tetrazólio foram mantidos em câmara tipo BOD a 37 °C, no escuro, por 2 h para colorir. Após este período, as sementes foram lavadas em água corrente e mantidas submersas em água destilada na temperatura de 10 °C até o momento das análises. Os resultados foram expressos em porcentagem de viabilidade e vigor (França Neto *et al.*, 1999).

#### 2.4. Análises da atividade de enzimas antioxidantes

**Amostra:** A quantificação das enzimas do sistema antioxidante foi feita a partir de plântulas com três dias de germinação. Quatro repetições de 50 sementes foram colocadas para germinar, conforme a metodologia descrita no teste de germinação. Após três dias, os tegumentos e cotilédones foram removidos e apenas os eixos hipocótilo-radícula foram congelados em nitrogênio líquido. Em seguida, o material vegetal foi liofilizado (Liofilizador Scanvac CoolSafe) para desidratação e manutenção das estruturas orgânicas durante o armazenamento e posteriores avaliações. Após o processo de desidratação, o material vegetal foi macerado utilizando o equipamento Tissuelyser da Retsch, vibratório, modelo MM 400, na frequência de 29,0 Hz por 2 min. Em seguida, o material foi armazenado em microtubos tipo *eppendorf* de 2 mL e mantido em dessecador até o momento das análises.

**Preparo do extrato enzimático:** Quatro repetições de 0,150 g das amostras homogeneizadas foram misturadas com polivinilpirrolidona (PVPP) 1 % (p/v) e a solução coquetel de tampão fosfato de potássio a 0,1 M, pH 6,8, ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) 0,1 mM, fluoreto de fenilmetilsulfônico (PMSF) 1 mM (Peixoto et al., 1999). Dessa maneira, 2 mL da solução coquetel foi adicionada em microtubos tipo *eppendorf* já contendo 0,150g de amostra e 1% (p/v) de PVPP. Imediatamente, o *eppendorf* foi agitado com vórtex por 1 min e armazenado no gelo até o processo de centrifuga. Por fim, os *eppendorfs* foram centrifugados a 14.000 xg por 15 minutos a 4 °C para retirada da camada do sobrenadante.

**Proteína:** A quantificação de proteína foi determinada pelo método de Bradford (1976), no qual utiliza o reagente BSA como padrão. Uma alíquota de 2,5 µL de extrato enzimático foi diluída em 1 mL de água destilada e adicionada em 1 mL de solução de Bradford. As leituras da absorbância das amostras foram feitas no espectrofotômetro modelo Thermo Scientific™ UV-Vis Genesys 10S no comprimento de onda de 595 nm.

**Superóxido dismutase (SOD):** A atividade foi determinada adicionando 50 µL de extrato enzimático ao meio de reação constituído de tampão fosfato de sódio 50 mM, pH 7,8, contendo metionina 13 mM, azul de p-nitro tetrazólio (NBT) 75 µM, EDTA 0,1 mM e riboflavina 2 µM (Del Longo et al., 1993). A reação foi realizada em temperatura de 25 °C dentro de uma câmara revestida de papel alumínio com iluminação fluorescente de 15 W. Após 5 min de exposição a luz, a reação foi medida pela absorbância de 560 nm da formazana azul produzida pela fotorredução do NBT. As leituras da absorbância das amostras foram feitas no espectrofotômetro modelo Thermo Scientific™ UV-Vis Genesys 10S. Os resultados foram expressos com a quantidade de enzimas necessária para inibir em 50% a fotorredução do NBT (Beauchamp; Fridovich, 1971).

**Catalase (CAT):** A atividade foi determinada adicionando 50 µL de extrato enzimático ao meio de reação constituído de tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 7,0 e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 12,5 mM (Havir & Mchale 1987). A reação foi realizada em temperatura de 25 °C com leituras das amostras pela absorbância de 240 nm utilizando espectrofotômetro modelo Thermo Scientific™ UV-Vis Genesys 10S. A atividade enzimática foi calculada com o coeficiente de extinção molar de 36 mM<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> e o resultado expresso em µmol min<sup>-1</sup> mg<sup>-1</sup> de proteína (Anderson et al., 1995).

**Peroxidase do ascorbato (APX):** A atividade foi determinada adicionando 100  $\mu\text{L}$  de extrato enzimático ao meio de reação constituído de tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 7,8, ácido ascórbico 0,25 mM, EDTA 0,1 mM e  $\text{H}_2\text{O}_2$  0,3 mM. A reação foi realizada em temperatura de 25 °C com leituras das amostras pela absorbância de 290 nm utilizando espectrofotômetro modelo Thermo Scientific™ UV-Vis Genesys 10S. A atividade enzimática foi calculada com o coeficiente de extinção molar de  $2,8 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  e o resultado expresso em  $\text{nmol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$  de proteína (Nakano; Asada, 1981).

**Peroxidases (POX):** A atividade foi determinada adicionando 50  $\mu\text{L}$  de extrato enzimático ao meio de reação constituído de tampão fosfato de potássio 25 mM, pH 6,8, guaiacol 20 mM e  $\text{H}_2\text{O}_2$  20 mM (Kar e Mishra, 1976). A reação foi realizada em temperatura de 25 °C com leituras das amostras pela absorbância de 420 nm utilizando espectrofotômetro modelo Thermo Scientific™ UV-Vis Genesys 10S. A atividade enzimática foi calculada com o coeficiente de extinção molar de  $2,47 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  e o resultado expresso em  $\mu\text{mol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$  de proteína (Nakano; Asada, 1981).

## 2.5. Análise estatística

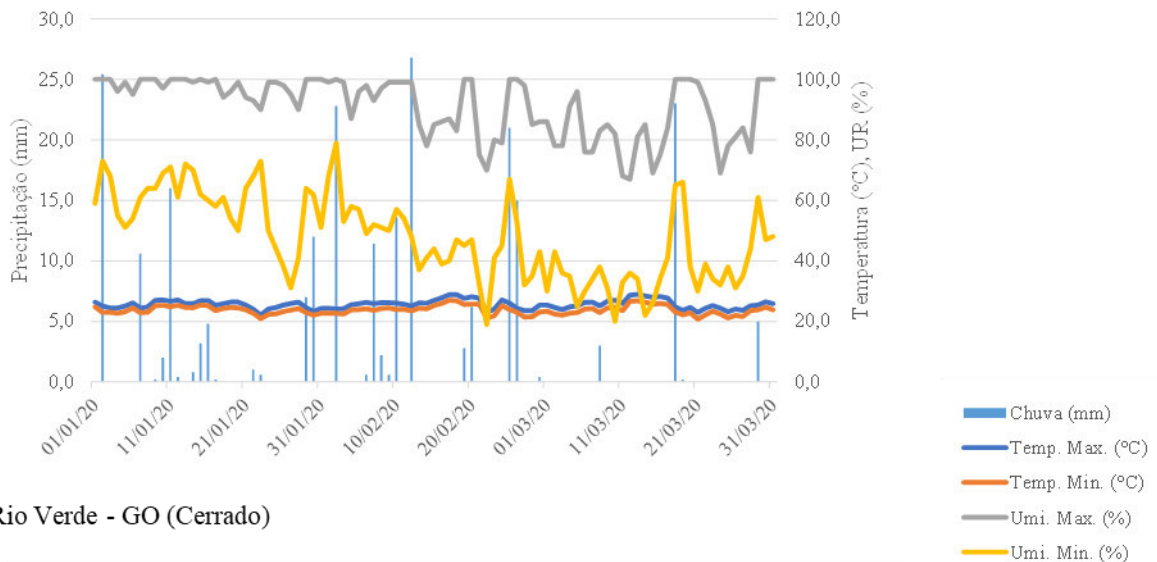
O experimento foi conduzido em DIC, em esquema de parcela subdividida. Os períodos de armazenamento foram alocados nas parcelas e os estádios de dessecação nas sub-parcelas. Os dados obtidos nas análises fisiológicas e bioquímicas foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas por meio do teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Análises multivariadas de componentes principais (PCA) e correlação de Pearson ( $p\text{-valor} \leq 0,05$ ) foram realizadas para identificar as relações entre os dados enzimáticos e vigor das sementes dessecadas. As análises estatísticas foram processadas no software R (R Core Team 2022).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período de colheita, os cultivares Zeus e NS 5445 estiveram sujeitos, em menor frequência, a ocorrências de chuva, oscilações de temperatura e umidade comparados com o cultivar Foco (Figura 1). As sementes do cultivar Foco foram cultivadas em Rio Verde e estiveram expostas a chuvas superiores a 80 mm, além de muitos períodos de chuva (Figura 1). É notável também a diferença de temperaturas máximas e mínimas entre as regiões de produção das sementes no cerrado e sul do Brasil. Baixa diferença nas temperaturas foram observadas no município de Toledo onde foram produzidas as sementes do cultivar Zeus e NS

5445 e alta diferença nas temperaturas foram observadas no município de Rio Verde. Também em Rio Verde, a umidade relativa apresentou baixa amplitude entre máxima e mínima, mantendo a umidade alta ao longo do período de colheita. Ao contrário, em Toledo, a alta amplitude da umidade relativa pode indicar períodos mais secos ao longo do dia e colheita.

#### Toledo - PR (Sul)



#### Rio Verde - GO (Cerrado)

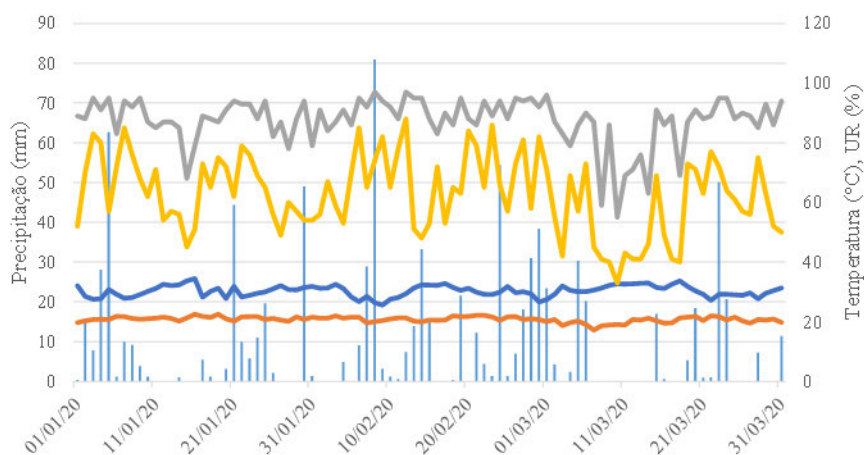


Figura 1. Dados meteorológicos dos ambientes de produção no período de colheita (01/01/2020 a 31/03/2020).

Considerando o potencial de germinação, as sementes do cultivar Zeus tiveram maior porcentagem de germinação quando colhidas no estágio R8, sem dessecação. Já as sementes do cultivar NS 5445 apresentaram alta porcentagem de germinação inicialmente e ao longo de todo armazenamento quando foram desseçadas no estágio R7.3. Para o cultivar Foco, as maiores porcentagens de germinação foram de sementes desseçadas nos estádios R7 e R7.3 (Tabela 1).

O teste de germinação está relacionado ao potencial máximo de germinação que um lote pode atingir em condições ótimas. Assim, condições diferentes da considerada ideal para germinação podem levar à redução de qualidade e em casos extremos processos críticos de deterioração nas sementes (Fialho *et al.*, 2022). Esses processos degenerativos, que ocorrem durante o armazenamento, geram disfunções celulares importantes nas sementes. Os principais danos causados são peroxidação de lipídeos, perda da viabilidade das membranas, perda da viabilidade das mitocôndrias, danos ao DNA, redução de ATP, perda da compartimentalização celular e desbalanço metabólico (Santos; Menezes; Villela, 2004; Kumar *et al.*, 2015). É importante destacar que a diferença da qualidade das sementes dessecadas também está relacionada ao grau de maturidade das sementes. Além disso, as sementes estão condicionadas aos fatores ambientais do período de colheita (Figura 1).

Tabela 1. Germinação de sementes de soja dos cultivares Zeus, NS 5445 e Foco após dessecação em diferentes estádios e armazenamento.

Cultivar	Armazenamento	Estádio de Dessecação (%)			média
		R7	R7.3	R8	
Zeus	0 meses	81 Ac	87 Ab	93 Aa	87
	4 meses	85 Aab	81 Bb	88 Aa	85
	8 meses	50 Bc	56 Cb	66 Ba	52
	Média	72	75	82	3,5* e 4,0**
NS 5445	0 meses	94	96	90	93 A
	4 meses	84	91	91	89 B
	8 meses	79	89	84	84 C
	Média	86 b	92 a	88 b	3,0* e 4,3**
Foco	0 meses	88	85	79	84 A
	4 meses	90	87	78	85 A
	8 meses	86	75	71	77 B
	média	88 a	82 a	76 b	6,3* e 3,9**

Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Coeficiente de variação 1(\*) e 2(\*\*).

A performance das sementes no campo pode ser estimada a partir de testes que submetem as sementes a diferentes condições de estresses. Além disso, cada lote de sementes possui suas próprias características, mesmo aqueles de mesmo genótipo, que podem variar muito o vigor dependendo do ambiente de desenvolvimento e armazenamento (Finch-Savage e Bassel, 2016; Weerasekara *et al.*, 2021). Nas tabelas 2.1 e 2.2, pode-se observar que o vigor

das sementes diferiu entre as épocas de dessecação e os períodos de armazenamento. O cultivar Zeus apresentou interação significativa entre os períodos de armazenamento e os estádios de dessecação em todos os testes de qualidade fisiológica, exceto a matéria seca de plântulas (MSP) (Tabela 2.2). Já os cultivares NS 5445 e Foco não apresentaram interação significativa entre o período armazenado e os estádios de dessecação para maioria dos testes de qualidade fisiológica (Tabela 2.1 e 2.2).

O vigor das sementes reduziu aos oito meses de armazenamento para todas as cultivares. Comparando os tratamentos de dessecação aos 8 meses, O cultivar Zeus produziu sementes de maior qualidade quando colhidas em R8 sem dessecação. Para o cultivar NS 5445, as sementes no estádio R7.3 ou colhidas em R8 tiveram maior qualidade. Já para o cultivar Foco, a dessecação no estádio R7 foi a que proporcionou sementes de maior qualidade fisiológica (Tabelas 2.1 e 2.2). É possível encontrar diferentes resultados quanto ao momento ideal de dessecação na cultura da soja. Pereira et al. (2015) indicou que dessecações no estádio R7.1 podem proporcionar sementes com maior viabilidade e vigor. Zuffo et al. (2019) dessecaram as plantas em R7.1 e colheram em três épocas 0, 7 e 14 dias após atingir o estádio R8. Esses autores observaram sementes de alta qualidade no estádio R8 + 7 dias e sementes de baixa qualidade no estádio R8 + 14 dias. Já Zanatta et al. (2018) relatam que dessecações em R7.1 e R7.3 levam a redução no vigor das sementes. Por outro lado, Bezerra et al. (2016) observaram redução de produção e vigor em R5.7 e R6.5. Enquanto a dessecação em R7.3 a produção e o vigor não foram alterados quando comparado ao estádio R8.

A relação entre o período de armazenamento e o estádio de dessecação mostrou variações na velocidade de germinação e emergência de plântulas de acordo com os testes de primeira contagem de germinação (PCG) e índice de velocidade de emergência (IVE) (Tabela 2.1). Nestes testes, as sementes do cultivar Zeus colhidas no estádio R8, ou do cultivar NS 5445, dessecadas em R7.3 ou colhidas em R8, e do cultivar Foco, dessecadas em R7 apresentaram melhor desempenho, reduzindo somente aos 8 meses de armazenamento (Tabelas 2.1 e 2.2). Essas diferenças na velocidade de germinação indicam que o vigor das sementes reduziu com a dessecação. A redução na velocidade de germinação das sementes entre os estádios de dessecação e aos oito meses de armazenamento ocorreu devido ao avanço da deterioração das sementes. Certamente para o cultivar Foco, os processos de deterioração foram potencializados com as condições chuvosas no final do ciclo de desenvolvimento das sementes desse cultivar (Figura 1). Condições chuvosas podem causar danos por umidade nos tecidos celulares das

sementes e assim expõem de forma mais sensível os tecidos do embrião aos estresses ambientais (Pinheiro *et al.*, 2021). Isso explica o porquê das sementes dessecadas no estágio R7 do cultivar Foco terem melhor qualidade, uma vez que ficaram menos tempo expostas às oscilações de temperatura e umidade no campo (Figura 1).

Tabela 2.1. Primeira contagem de germinação (PCG), envelhecimento acelerado (EA), emergência de plântulas (EP) e condutividade elétrica (CE) obtidos para sementes dos cultivares Zeus, NS 5445 e Foco após dessecação em diferentes estádios e armazenamento.

Testes	Tempo	Estádios de Dessecação											
		Zeus				NS 5445				Foco			
		R7	R7.3	R8	Média	R7	R7.3	R8	Média	R7	R7.3	R8	Média
PCG (%)	0	75 <sup>Bb</sup>	82 <sup>Aa</sup>	87 <sup>Aa</sup>	81	91 <sup>Aa</sup>	94 <sup>Aa</sup>	88 <sup>Aa</sup>	91	85 <sup>Aa</sup>	77 <sup>Aa</sup>	75 <sup>Ab</sup>	79
	4	84 <sup>Aa</sup>	77 <sup>Aa</sup>	81 <sup>Aa</sup>	81	79 <sup>Bb</sup>	90 <sup>Aa</sup>	89 <sup>Aa</sup>	86	85 <sup>Aa</sup>	80 <sup>Aa</sup>	73 <sup>ABb</sup>	79
	8	45 <sup>Cb</sup>	51 <sup>Bb</sup>	65 <sup>Ba</sup>	54	72 <sup>Bb</sup>	81 <sup>Ba</sup>	80 <sup>Ba</sup>	78	87 <sup>Aa</sup>	69 <sup>Bb</sup>	67 <sup>Bb</sup>	74
	Média	68	70	78	4,8* e 6,1**	81	88	86	3,8* e 4,8**	86	75	72	5,3* e 5,0**
EA (%)	0	48 <sup>Ab</sup>	59 <sup>Aa</sup>	55 <sup>Aab</sup>	54	63	81	83	76 <sup>A</sup>	88	84	68	80 <sup>A</sup>
	4	38 <sup>Bb</sup>	54 <sup>Aa</sup>	49 <sup>Aa</sup>	47	51	66	71	63 <sup>B</sup>	88	78	70	79 <sup>B</sup>
	8	13 <sup>Cb</sup>	9 <sup>Bb</sup>	23 <sup>Ba</sup>	15	36	56	53	48 <sup>C</sup>	74	65	64	68 <sup>B</sup>
	Média	33	41	42	15,1* e 14,3**	50 <sup>b</sup>	68 <sup>a</sup>	69 <sup>a</sup>	10,0* e 8,0**	83 <sup>a</sup>	76 <sup>b</sup>	67 <sup>c</sup>	5,3* e 6,7**
EP (%)	0	77 <sup>Ab</sup>	90 <sup>Aa</sup>	91 <sup>Aa</sup>	86	86	97	97	93 A	92	94	81	89 <sup>A</sup>
	4	69 <sup>Bb</sup>	88 <sup>Aa</sup>	87 <sup>Aa</sup>	81	90	95	98	94 A	95	91	85	90 <sup>A</sup>
	8	77 <sup>Ab</sup>	81 <sup>Bab</sup>	85 <sup>Aa</sup>	81	89	95	96	93 A	92	92	82	89 <sup>A</sup>
	Média	74	86	88	6,4* e 3,5**	88 <sup>b</sup>	96 <sup>a</sup>	97 <sup>a</sup>	3,4* e 2,9**	93 <sup>a</sup>	92 <sup>a</sup>	83 <sup>b</sup>	3,7* e 4,6**
CE ( $\mu\text{Scm}^{-1}\text{g}^{-1}$ )	0	156,4 <sup>Ba</sup>	154,6 <sup>Ba</sup>	126,9 <sup>Cb</sup>	146,0	97,7	78,5	77,5	84,6 <sup>C</sup>	65,5	62,4	76,4	68,1 <sup>B</sup>
	4	238,2 <sup>Aa</sup>	198,8 <sup>Ab</sup>	203,3 <sup>Ab</sup>	213,4	142,6	127,1	124	131,2 <sup>A</sup>	74,9	82,2	98,9	85,3 <sup>A</sup>
	8	219,4 <sup>Aa</sup>	196,1 <sup>Ab</sup>	180,1 <sup>Bb</sup>	198,5	131,1	108,6	94,6	111,4 <sup>B</sup>	78,8	91,5	92,8	87,7 <sup>A</sup>
	Média	204,7	183,2	170,1	5,9* e 5,7**	123,8 <sup>a</sup>	104,7 <sup>b</sup>	98,7 <sup>b</sup>	9,3* e 9,9**	73,1 <sup>b</sup>	78,7 <sup>b</sup>	89,4 <sup>a</sup>	8,3* e 9,9**

Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. Tempo: 0, 4 e 8 meses de armazenamento. Coeficiente de variação 1(\*) e 2(\*\*).

Os testes que avaliam o desenvolvimento de plântulas como emergência de plântulas (EP), comprimento de plântula (CP) e matéria seca de plântula (MSP), indicaram maior desempenho de sementes do cultivar Zeus colhidas no estágio R8, ou do cultivar NS 5445, dessecadas em R7.3 ou colhidas em R8, e do cultivar Foco, dessecadas em R7 (Tabelas 2.1 e 2.2). A capacidade de transformação das reservas da semente para o desenvolvimento do eixo embrionário também determina a qualidade das sementes haja vista o normal crescimento das estruturas radicular e parte aérea da plântula (Finch-Savage e Bassel, 2016). No teste de emergência, os cultivares NS 5445 e Foco não apresentaram significativa redução do vigor durante o armazenamento, exceto o cultivar Zeus que teve manutenção da emergência apenas nas sementes colhidas e não dessecadas no estágio R8 (Tabela 2). O comprimento e a matéria seca das plântulas tiveram resultados menos conclusivos. Contudo, observa-se a tendência da redução do tamanho ao longo do armazenamento, ou seja, plântulas menores com pouco desenvolvimento de tecido vegetal (Tabela 2).

Os testes de envelhecimento acelerado (EA) e condutividade elétrica (CE) também mostraram a redução do vigor das sementes com o armazenamento e época de dessecação (Tabela 2.1). Foram observadas maiores porcentagens de germinação no teste de envelhecimento acelerado em sementes dessecadas no estágio R7.3 ou R8, para o cultivar Zeus, e R7, para o cultivar Foco, independente do período de armazenamento (Tabela 2.1). Para o cultivar Zeus, o teste de envelhecimento acelerado identificou redução no vigor das sementes, independente da época de dessecação e armazenamento. Houve redução da germinação de 32 a 50 pontos percentuais comparando o teste de envelhecimento acelerado no momento de colheita e após oito meses de armazenamento, o que indica baixa capacidade de armazenamento das sementes do lote do cultivar Zeus (Tabela 2.1). Paralelamente, a análise de condutividade elétrica também indicou comportamento semelhante para os três cultivares. Novamente, destaca-se o cultivar Zeus com as maiores leituras de condutividade, evidenciando menor capacidade de reorganização das membranas celulares das sementes, independentemente da época de dessecação e armazenamento.

O processo de deterioração das sementes é um fator biológico natural que corresponde a uma série de mudanças degenerativas, causadas pelo excesso de espécies reativas de oxigênio (EROs), em estruturas físico-químicas responsáveis pela proteção e desenvolvimento normal do embrião ao longo do tempo (Noctor *et al.*, 2018; Ebone *et al.*, 2019). Vale considerar também que nesse trabalho as sementes apresentaram diferenças na qualidade inicial haja vista os efeitos

da maturação desuniforme, dessecação e ambiente de produção. Esse processo natural reduz a viabilidade e vigor das sementes e pode ser potencializado com a variação da temperatura, condições climáticas, pragas, doenças e tratos culturais como a dessecação (Zuffo *et al.*, 2017, 2020; Pinheiro *et al.*, 2021; Fialho *et al.*, 2022). As sementes sofrem com reações de açúcares reduzidos com enzimas e material genético, danos oxidativos, peroxidação de lipídios e desorganização de membranas celulares. Essa série de reações colapsa toda estrutura metabólica e as reservas das sementes causando a redução do vigor (Ebone *et al.*, 2019).

Tabela 3.2. Índice de velocidade de emergência (IVE), comprimento de total de plântula (CTP) e matéria seca de plântulas (MSP) obtidos para sementes dos cultivares Zeus, NS 5445 e Foco após dessecação em diferentes estádios e armazenamento.

Testes	Tempo	Estádios de Dessecação											
		Zeus				NS 5445				Foco			
		R7	R7.3	R8	Média	R7	R7.3	R8	Média	R7	R7.3	R8	Média
IVE	0	7,9 <sup>Ab</sup>	10,2 <sup>Aa</sup>	10,2 <sup>Aa</sup>	9,4	9,4	10,9	10,8	10,4 <sup>A</sup>	9,7 <sup>Aa</sup>	8,7 <sup>Bb</sup>	7,6 <sup>Bc</sup>	8,7
	4	7,3 <sup>Ab</sup>	9,6 <sup>Aa</sup>	9,4 <sup>Aa</sup>	8,8	9,6	9,9	10,4	10,0 <sup>A</sup>	9,0 <sup>Aba</sup>	9,7 <sup>Aa</sup>	9,3 <sup>Aa</sup>	9,3
	8	7,0 <sup>Aa</sup>	7,5 <sup>Ba</sup>	7,6 <sup>Ba</sup>	7,4	7,3	8,9	8,8	8,3 <sup>B</sup>	8,3 <sup>Ba</sup>	7,6 <sup>Cab</sup>	7,2 <sup>Bb</sup>	7,7
	Média	7,4	9,1	9,1	8,3* e 5,5**	8,8 <sup>b</sup>	9,9 <sup>a</sup>	10,0 <sup>a</sup>	6,7* e 4,8**	9,0	8,7	8,0	6,3* e 5,4**
CTP (cm)	0	5,4 <sup>Aa</sup>	4,8 <sup>Aa</sup>	5,5 <sup>Aa</sup>	5,2	5,4 <sup>Ab</sup>	7,0 <sup>Aa</sup>	6,6 <sup>Aa</sup>	6,3	7,0 <sup>Aa</sup>	6,0 <sup>Ab</sup>	4,5 <sup>Ac</sup>	5,8
	4	2,3 <sup>Bb</sup>	3,1 <sup>Ba</sup>	2,9 <sup>Bab</sup>	2,8	3,2 <sup>Ba</sup>	3,9 <sup>Ca</sup>	3,9 <sup>Ca</sup>	3,7	3,9 <sup>Ba</sup>	2,6 <sup>Cb</sup>	1,8 <sup>Bb</sup>	2,8
	8	2,7 <sup>Bab</sup>	2,8 <sup>Ba</sup>	2,0 <sup>Cb</sup>	2,5	3,0 <sup>Bb</sup>	5,4 <sup>Ba</sup>	5,1 <sup>Ba</sup>	4,5	4,3 <sup>Ba</sup>	4,7 <sup>Ba</sup>	4,3 <sup>Ca</sup>	4,4
	Média	3,5	3,6	3,5	16,2* e 8,1**	3,9	5,4	5,2	10,3* e 8,5**	5,1	4,4	3,5	11,2* e 11,5**
MSP (mg)	0	21,4	21,1	25,2	22,6 <sup>A</sup>	23,3 <sup>Aa</sup>	25,1 <sup>Aa</sup>	25,5 <sup>Aa</sup>	24,6	25,9	24,8	20,4	23,7 <sup>A</sup>
	4	14,8	20,3	17,9	17,7 <sup>B</sup>	16,3 <sup>Bb</sup>	21,5 <sup>Ba</sup>	21,6 <sup>Ba</sup>	19,8	19,1	13,4	14,3	15,6 <sup>B</sup>
	8	18,2	21,4	18,3	19,3 <sup>B</sup>	18,3 <sup>Bb</sup>	26,2 <sup>Aa</sup>	25,1 <sup>Aa</sup>	23,2	24,7	23,6	21,8	23,4 <sup>A</sup>
	Média	18,1 <sup>a</sup>	20,9 <sup>a</sup>	20,5 <sup>a</sup>	13,8* e 13,3**	19,3	24,3	24,1	10,2* e 7,1**	23,2 <sup>a</sup>	20,6 <sup>b</sup>	18,8 <sup>b</sup>	11,0* e 13,2**

Médias seguidas pelas mesmas letras, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Tempo: 0, 4 e 8 meses de armazenamento. Coeficiente de variação 1(\*) e 2(\*\*).

O teste de tetrazólio é um teste rápido que permite identificar a qualidade das sementes e estimar a viabilidade e o vigor de lotes de sementes. Além disso, permite rastrear os principais problemas que reduzem a qualidade das sementes como ataque de insetos, danos mecânicos e danos por umidade (França Neto *et al.*, 1999). Os resultados para o teste de tetrazólio foram similares aos observados pelos testes de vigor (Tabela 2). Nesses testes, as sementes no estádio R8, para a cultivar Zeus, R7.3 ou R8, para a cultivar NS 5445, e R7 ou R7.3, para a cultivar Foco, apresentaram maior viabilidade (Tabela 3). Já as sementes colhidas no estádio R8, das cultivares Zeus e NS 5445, e R7 ou R7.3, da cultivar Foco, foram as que apresentaram maior vigor (Tabela 3).

Um dos principais fatores que afetaram a qualidade das sementes do cultivar Foco foi a presença de danos por umidade. Essas sementes sofreram com as chuvas de final de ciclo e ficaram expostas à variação de umidade (Figura 1). Assim, com a capacidade higroscópica das sementes, o teor de água foi constantemente alterado de acordo com a precipitação e seca do ambiente de produção. De acordo com Vergara *et al.* (2019), sementes que ficam por mais tempo no campo em condições de estresse apresentam maior incidência de danos por umidade. O dano por umidade ocorre devido ao grande volume de precipitação e principalmente pelas oscilações de umidade nas sementes comprometendo os tecidos do embrião. Pinheiro *et al.* (2021) identificaram que níveis de precipitação de 120 a 180 mm podem reduzir o potencial fisiológico e comprometer a estrutura dos tecidos do embrião em diferentes cultivares de soja. Fialho *et al.* (2022) identificaram que colheitas de sementes após 20 e 30 dias do estádio R8, dependendo do cultivar, reduzem o vigor das sementes. No mesmo sentido, Vergara *et al.* (2019) mostra que os danos por umidade levam a significativos prejuízos fisiológicos em sementes que ficaram expostas a ciclos de precipitação.

Tabela 4. Viabilidade e vigor avaliados por meio do teste de tetrazólio em sementes de três cultivares de soja submetidas a dessecação e armazenamento por oito meses.

Avaliações	Cultivar	Estádios de Dessecação		
		R7	R7.3	R8
Viabilidade	Zeus	91	87	98
	NS 5445	88	91	94
	Foco	92	94	83
Vigor	Zeus	54	60	89
	NS 5445	67	71	85
	Foco	84	88	71

Nível de vigor de acordo com França Neto et al. (1999): muito alto:  $\geq 90\%$ ; alto: 85 a 89%; médio: 75 a 84%; baixo:  $\leq 74\%$ .

O vigor de sementes depende essencialmente da sua capacidade de resistir aos fatores deletérios do envelhecimento. Assim, podemos inferir que o vigor e o processo de deterioração são fenômenos relacionados (Ebone *et al.*, 2019). Considerando a interação entre esses fenômenos, verificamos a capacidade de reposição do mecanismo enzimático de defesa antioxidativo das sementes aos efeitos de dessecação e armazenamento. Foi possível identificar que existe interação significativa entre as épocas de dessecação e o período de armazenamento nas atividades enzimáticas das enzimas analisadas: superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase do ascorbato (APX) e peroxidase (POX) (Figura 2).

A SOD apresenta atividade antioxidante responsável pela dismutação do radical superóxido em peróxido de hidrogênio, reduzindo a capacidade tóxica desse elemento no meio celular (Ebone et al., 2019). Portanto, o desbalanço dessa espécie reativa de oxigênio ou inativação das enzimas antioxidantes podem ser indicadores da redução da qualidade fisiológica das sementes. Dessa forma, a atividade enzimática pode indicar deterioração, já que o acúmulo do radical superóxido está associado positivamente com a perda da viabilidade, germinação e vigor das sementes (Yin *et al.*, 2014; Sahu *et al.*, 2017). Foi observada maior atividade da SOD em sementes do cultivar Zeus, quando dessecadas em R7 após 4 e 8 meses de armazenamento. A atividade da SOD nas sementes colhidas em R7 foi semelhante à das sementes colhidas em R8 (Figura 2A). Contudo, sementes colhidas em R8 não apresentaram diferenças na atividade enzimática ao longo do armazenamento. Para o cultivar Zeus, as sementes que foram colhidas em R8 apresentaram maior vigor, já as sementes de menor vigor foram dessecadas em R7 (Tabelas 2.1 e 2.2). As sementes do cultivar NS 5445 apresentaram maior atividade da SOD após quatro meses de armazenamento quando dessecadas no estádio R7 e R7.3. Já as sementes colhidas em R8 tiveram maior atividade de SOD somente aos oito meses, próximo ao dobro de atividade em relação ao início do armazenamento (Figura 2A). De maneira semelhante, as sementes do cultivar NS 5445 dessecadas em R7 também apresentaram redução de qualidade fisiológica (Tabelas 2.1 e 2.2).

Por outro lado, o Cultivar Foco, que apresentou sementes de maior qualidade quando dessecadas em R7, não apresentou diferença significativa na atividade da SOD ao longo dos oito meses de armazenamento (Figura 2A). Tanto as sementes dessecadas em R7.3 como as

colhidas em R8 apresentaram atividade de SOD maior que R7 logo após a colheita. Contudo, a atividade da enzima diminuiu após quatro e oito meses de armazenamento, o que indica processo de deterioração avançado haja vista a baixa qualidade das sementes dessecadas em R7.3 e colhidas em R8 do cultivar Foco (Figura 2A e Tabela 2). A SOD geralmente demonstra alta atividade enzimática quando existe alta presença de espécies reativas de oxigênio (EROs). Ao contrário, quando o estresse persiste a atividade enzimática pode decrescer com o avanço do dano (Ebone *et al.*, 2019; Zuffo *et al.*, 2020). Nesse sentido, a atividade da SOD pode estar relacionada com a qualidade fisiológica das sementes. Diferentemente, Zuffo *et al.* (2020) indica que a SOD tem baixa correlação com os testes de qualidade fisiológica em sementes pré-dessecadas, resultado também encontrado nesse trabalho (Figura 2).

As atividades das enzimas CAT e APX também foram avaliadas nas plântulas providas de sementes colhidas nos diferentes estádios de dessecação (Figuras 2 B e C). Para o cultivar Zeus, houve aumento da atividade enzimática da CAT em todos os estádios de dessecação aos oito meses de armazenamento (Figura 2B). Não houve alteração da atividade da enzima APX em sementes colhidas no estádio R8. Ao contrário, sementes dessecadas em R7 e R7.3 apresentaram maior atividade desta enzima, no qual em dessecações no estádio R7 observamos aumento da atividade enzimática aos oito meses de armazenamento e redução em sementes dessecadas no estádio R7.3 (Figura 2C). Tanto as atividades enzimáticas de CAT como APX nas sementes dos cultivares NS 5445 e Foco foram maiores em sementes colhidas em R8 após a colheita e aos oito meses de armazenamento (Figuras 2 B e C). As sementes do cultivar NS5445 dessecadas em R7, apresentou menor atividade nas enzimas CAT e APX após a colheita. Por outro lado, as sementes do cultivar Foco que sofreram com oscilação de umidade durante a colheita, apresentou maior atividade na enzima APX em sementes dessecadas em R7 e R7.3 após a colheita. Aos quatro meses de armazenamento essas diferenças não foram mais observadas na atividade das enzimas CAT e APX (Figura 2 B e C).

A baixa atividade da enzima CAT também foi observada em sementes de soja com 30 dias de atraso de colheita após atingirem o estádio R8 (Fialho *et al.*, 2022). No mesmo trabalho, a atividade da enzima APX variou com o cultivar e período de colheita, resultado semelhante a esse trabalho. Tanto a CAT quanto APX são enzimas envolvidas na quebra do peróxido de hidrogênio em água e oxigênio, mas diferentemente da CAT, a enzima APX utiliza o ácido ascórbico como redutor (Ebone *et al.*, 2019). Dessa maneira, essas enzimas são essenciais na

defesa à estresses oxidativos porquê equilibram e impedem o acúmulo de peróxido de hidrogênio no meio celular das sementes (Noctor *et al.*, 2018).

Quanto às enzimas POX, observamos redução na atividade aos oito meses de armazenamento de sementes dessecadas em R7, R7.3 e colhidas em R8 nas três cultivares analisadas (Figura 2D). Já nos primeiros quatro meses de armazenamento, as enzimas POX apresentaram alta atividade. As sementes do cultivar Zeus destacam-se pela alta atividade da enzima POX quando dessecadas no estágio R7.3 e colhidas em R8 sem dessecação, para o cultivar NS 5445 destaca-se as sementes dessecadas no estágio R7.3 (Figura 2D). A dessecação das plantas nestes estádios de maturação deu origem a sementes de maior qualidade sendo que os resultados dos testes de qualidade apresentaram alta correlação com a atividade da POX (Figura 3 A e B). Similarmente, o cultivar Foco durante os quatro primeiros meses de armazenamento também apresentou plântulas com alta atividade das enzimas POX. Contudo, nesse período as sementes colhidas em R8 já apresentavam redução significativa da atividade dessa enzima comparada as sementes dessecadas em R7 e R7.3 (Figura 2D). Esse resultado pode indicar que a capacidade de desintoxicação do meio celular pelas enzimas POX seja comprometida com a longa exposição das sementes as oscilações de umidade, fato ocorrido nas sementes colhidas no estágio R8 do cultivar Foco (Figura 1).

A enzima POX, assim como a APX, faz parte de um grande grupo de enzimas peroxidases que atuam na eliminação do peróxido de hidrogênio e em diversos outros processos fisiológicos (Noctor *et al.*, 2018). Em estudo sobre o atraso de colheita em sementes de soja foi observada redução na atividade das enzimas POX (Fialho *et al.*, 2022). Nossa pesquisa identificou também que a atividade da enzima POX diminui aos oito meses de armazenamento independentemente do estágio de dessecação. Tendo em vista esta redução na atividade enzimática aos oito meses de armazenamento é possível que o acúmulo de espécies reativas de oxigênio possa ter levado a inibições enzimáticas, aumento do processo respiratório e outros efeitos que contribuem para deterioração das sementes (Ebone *et al.*, 2019; Kurek *et al.*, 2019).

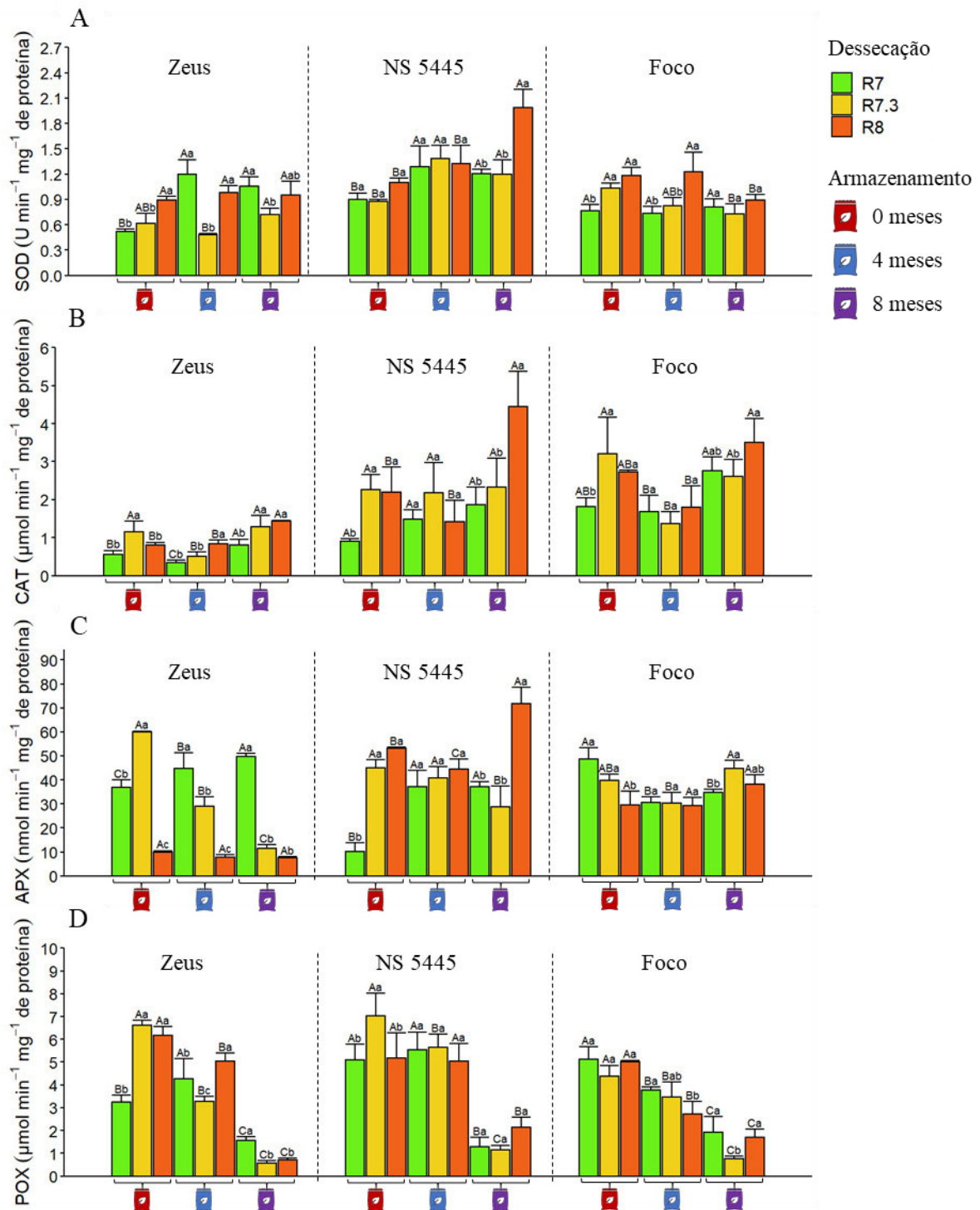


Figura 2. Atividade de enzimas antioxidantes superóxido dismutase (A), catalase (B), peroxidase do ascorbato (C) e peroxidase (D) de sementes de três cultivares de soja submetidas a dessecação e armazenamento. Médias seguidas por letras iguais minúsculas, comparando os estádios de dessecação, e letras maiúsculas, comparando os períodos de armazenamento, não diferem a 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

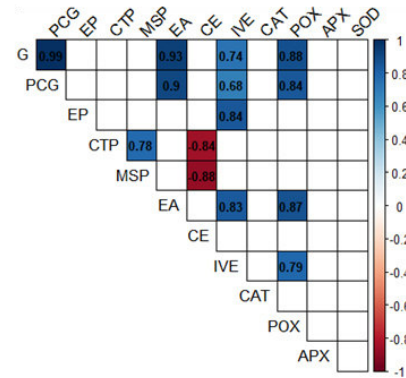
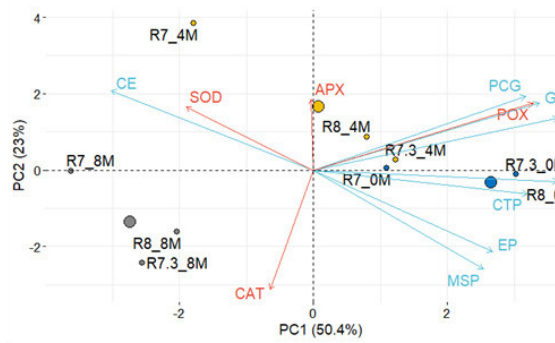
As análises multivariadas de componentes principais (PCA) e correlações de Pearson entre os dados de qualidade das sementes das três cultivares resume os principais resultados bioquímicos e fisiológicos de sementes de soja dessecadas e armazenadas por oito meses (Figura 3). As PCAs explicaram a variação dos dados (PC1 e PC2) superior a 70% para todos cultivares avaliados (Figura 3). Os vetores fisiológicos em azul das PCAs destacaram as sementes de alto vigor a direita (+PC1) e baixo vigor a esquerda (-PC1), e reforça as observações de perda de qualidade das sementes dessecadas e armazenadas. Os três cultivares apresentaram redução de vigor ao longo do armazenamento, no qual é possível observar os tratamentos distribuídos nas PCAs ao longo de oito meses do lado oposto dos vetores fisiológicos que indicam maior qualidade das sementes (Figura 3). Sementes dessecadas no estágio R7.3 e colhidas no estágio R8 sem dessecação apresentaram maior vigor nos cultivares Zeus e NS 5445, observando cada período de armazenamento (Figura 3). Já o cultivar Foco produziu sementes de maior vigor quando foram dessecadas no estágio R7 (Figura 3).

Do ponto de vista bioquímico, destacado pelos vetores em vermelho, a enzima POX apresenta correlação positiva com as análises de qualidade fisiológica, uma vez que acompanha o mesmo sentido dos vetores que determinam alto vigor nos três cultivares (Figura 3). As características de qualidade que tiveram correlação significativa com a enzima POX foram a Germinação (G) 0,88 e 0,68, Primeira Contagem de Germinação (PCG) 0,84 e 0,79, Envelhecimento Acelerado (EA) 0,87 e 0,72 e Índice de Velocidade de Emergência (IVE) 0,79 e 0,84 nos cultivares Zeus e NS 5445, respectivamente (Figura 3). Já para o cultivar Foco, a enzima POX apresentou correlação significativa e inversa com a condutividade elétrica (CE) - 0,74, que também é inversamente proporcional aos vetores que indicam alto vigor das sementes (Figura 3). De maneira similar, a enzima APX também apresentou correlação significativa com as características de qualidade fisiológica como a emergência de plântulas (EP) de 0,69 no cultivar NS 5445, de 0,80 com o comprimento de plântula (CP) e de 0,77 com a matéria seca de plântula (MSP) no cultivar Foco (Figura 3).

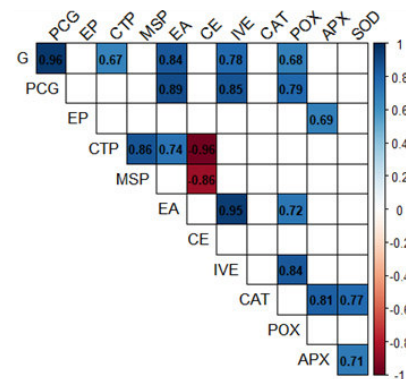
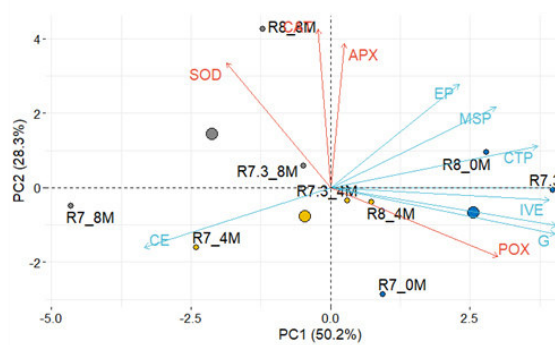
As enzimas CAT e SOD apresentaram baixa correlação com as características de qualidade fisiológica. Em todas as cultivares essas enzimas tiveram seus vetores opostos às características que denotam alta qualidade fisiológica (Figura 3). Dessa forma, os tratamentos de dessecação no mesmo sentido dos vetores enzimáticos CAT e SOD apresentaram baixa qualidade e maior atividade dessas enzimas, haja vista o aumento do processo de deterioração. Dessa maneira, foi observada correlação significativa e inversa da enzima CAT com o índice

de velocidade de emergência (IVE) de -0,81 no cultivar Foco (Figura 3). Já a enzima SOD não apresentou correlação com as características de qualidade fisiológica, mas foi observada correlação com as enzimas CAT (0,77) e APX (0,71) no cultivar NS 5445 (Figura 3).

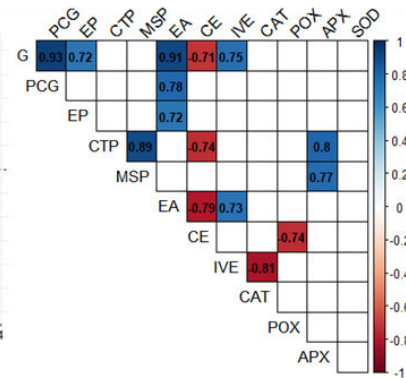
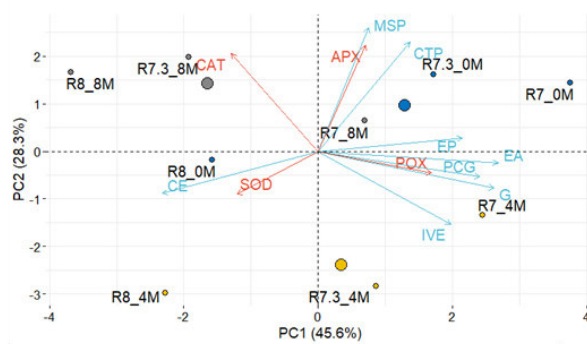
Zeus



NS 5445



Foco



- Armazenamento
- 0\_meses\_(0M)
- 4\_meses\_(4M)
- 8\_meses\_(8M)
- Atributos
- Bioquímico
- Fisiológico

Figura 3. Biplot da análise de componentes principais e correlação linear de Pearson obtidas dos testes de qualidade fisiológica e análises bioquímicas de três cultivares de soja submetidos

a dessecação e armazenamento. Análises: germinação (G), primeira contagem de germinação (PCG), envelhecimento acelerado (EA), condutividade elétrica (CE), emergência de plântulas (EP), índice de velocidade de emergência (IVE), comprimento de total de plântula (CTP), matéria seca de plântulas (MSP), catalase (CAT), peroxidase (POX), peroxidase do ascorbato (APX) e superóxido dismutase (SOD). Tratamentos: Rx\_yM, onde x: estágio de dessecação em R7, R7.3 ou colheita no estágio R8 e y: armazenamento por 0, 4 ou 8 meses.

#### **4. CONCLUSÃO**

As características fisiológicas e bioquímicas das sementes de soja dessecadas indicam que a qualidade varia com o cultivar, momento de dessecação e ambiente de produção. Para as condições em que foram produzidas, o cultivar Zeus produz sementes de maior qualidade quando colhidas em R8 sem dessecação. Para o cultivar NS 5445, sementes de alta qualidade são colhidas de plantas dessecadas no estágio R7.3 ou colhidas em R8. Já o cultivar Foco, a dessecação no estágio R7 é a que proporciona sementes de maior qualidade.

Em relação ao sistema de defesa antioxidativo, há redução na atividade das enzimas POX aos oito meses de armazenamento, independentemente do estágio de dessecação. As atividades enzimáticas da CAT e APX variam de acordo com as cultivares e apresentam aumento com tratamentos de dessecação que deram origem a sementes de maior qualidade fisiológica. A atividade da SOD não apresentou correlação com os testes de qualidade fisiológica de sementes dessecadas.

## REFERÊNCIAS

- Anderson, M. D.; Prasad, T. K.; Stewart, C. R. Changes in Isozyme Profiles of Catalase, Peroxidase, and Glutathione Reductase during Acclimation to Chilling in Mesocotyls of Maize Seedlings. *Plant physiology*, v. 109, n. 4, p. 1247–1257, 1 dez. 1995.
- Andrade, G.C., Medeiros Coelho, C.M. and Uarrota, V.G. (2020) Modelling the vigour of maize seeds submitted to artificial accelerated ageing based on ATR-FTIR data and chemometric tools (PCA, HCA and PLS-DA). *Heliyon*, **6**, e03477. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03477>
- De Araújo, D.L., Lazzari, M.P., Dutra, R., Lajús, C.R., Klein, C., Cericato, A., Sordi, A. and Junges, M. (2018) Influence of soybean desiccation periods on its germination potential and yield components. *Revista Brasileirade Ciências Agrarias*, **13**, 1–6. <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i4a5584>
- Benedet, L., Faria, W.M., Silva, S.H.G., Mancini, M., Guilherme, L.R.G., Demattê, J.A.M. and Curi, N. (2020) Soil subgroup prediction via portable X-ray fluorescence and visible near-infrared spectroscopy. *Geoderma*, **365**, 114212. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114212>
- Bezerra, A.R.G., Sedyama, T., Borém, A. and Soares, M.M. (2015) Importância Econômica. In *Soja: do Plantio a Colheita* (eds. T. Sedyama, F. Silva & Aluizio Borém), pp. 9–26, UFV, Viçosa, MG.
- Bezerra, A.R.G., Sedyama, T., Cruz, C.D., Dos Santos Silva, F.C., Da Silva, A.F., Rosa, D.P. and Dos Santos Dias, L.A. (2016) Productivity and quality of soybean seeds of determinate and indeterminate growth types desiccated in pre-harvest. *Australian Journal of Crop Science*, **10**, 693–700. <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.05.p7421>
- Borràs, E., Ferré, J., Boqué, R., Mestres, M., Aceña, L. and Busto, O. (2015) Data fusion methodologies for food and beverage authentication and quality assessment - A review. *Analytica Chimica Acta*, **891**, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.04.042>
- BRASIL. (2009) *Regras Para Análise de Semente.*, Primeira (ed Secretaria de Defesa Agropecuária). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília.
- Carvalho, N.M. de and Nakagawa, J. (2012) *Sementes: Ciência, Tecnologia e Produção.*, 5<sup>o</sup> (ed Funep).
- Chollet, F. (2020) Structured data classification from scratch.URL [https://keras.io/examples/structured\\_data/structured\\_data\\_classification\\_from\\_scratch/](https://keras.io/examples/structured_data/structured_data_classification_from_scratch/) [accessed 20 July 2021]

- CONAB. (2021) *Acompanhamento Da Safra Brasileira de Grãos*. Brasília DF.
- Daltro, E.M.F., Albuquerque, M.C. de F. e, França Neto, J. de B., Guimarães, S.C., Gazziero, D.L.P. and Henning, A.A. (2010) Aplicação de dessecantes em pré-colheita: efeito na qualidade fisiológica de sementes de soja. *Revista Brasileira de Sementes*, **32**, 111–122. <https://doi.org/10.1590/s0101-31222010000100013>
- Ebone, L.A., Caverzan, A. and Chavarria, G. (2019) Physiologic alterations in orthodox seeds due to deterioration processes. *Plant Physiology and Biochemistry*, **145**, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.10.028>
- EMBRAPA. (2020) Distribuição vertical da composição química e da uniformidade no tamanho de grãos em plantas de soja de tipo de crescimento determinado e indeterminado. *Boletim de pesquisa e desenvolvimento*, 1–32.
- Fehr, W.R. and Caviness, C.E. (1977) Stages of Soybean Development. *Special report*, **80**, 11.
- Fialho, C.A., Dias, D.C.F. dos S., Pinheiro, D.T., Oliveira, A.M.S., Soares, T.F.S.N. and Silva, L.J. da. (2022) Antioxidant and physiological responses of seeds of soybean cultivars to delayed harvest. *Semina: Ciências Agrárias*, **43**, 1127–1144. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2022v43n3p1127>
- Finch-Savage, W.E. and Bassel, G.W. (2016) Seed vigour and crop establishment: Extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, **67**, 567–591. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>
- Flores, M.F., Panobianco, M. and Konflanz, V.A. (2016) Qualidade fisiológica e rendimento de sementes de soja em função do hábito de crescimento da planta. Universidade Federal do Paraná.
- França-Neto, J., Krzyzanowski, F., Henning, A. and Lorini, I. (2012) Semente esverdeada de soja: causas e efeitos sobre o desempenho fisiológico - Série Sementes. *Circular Técnica-Embrapa soja*, 1–16.
- França Neto, J.B., Krzyzanowski, F.C. and Costa, N.P. da. (1999) Metodologia do teste de tetrazólio em sementes de soja. In *Vigor de Sementes: Conceitos e Testes* (eds. F.C. Krzyzanowski, R.D. Vieira & J. de B. França Neto), p. 218, ABRATES, Londrina, PR.
- Goldberg, R.B., Paiva, G. de and Yadegari, R. (1994) Plant Embriogenesis: Zygote to Seed. *Science*, **266**, 605–614.
- Hurburgh, C.R. (1994) Long-term soybean composition patterns and their effect on processing. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, **71**, 1425–1427. <https://doi.org/10.1007/BF02541367>

- IBGE. (2021) Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. URL <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html?=&t=o-que-e> [accessed 18 October 2021]
- INMET, I. de meteorologia. (2023) Instituto de meteorologia (INMET). URL <https://portal.inmet.gov.br/>
- Kumar, S.P.J., Rajendra Prasad, S.R., Banerjee, R. and Thammineni, C. (2015) Seed birth to death: Dual functions of reactive oxygen species in seed physiology. *Annals of Botany*, **116**, 663–668. <https://doi.org/10.1093/aob/mcv098>
- Kurek, K., Plitta-Michalak, B. and Ratajczak, E. (2019) Reactive oxygen species as potential drivers of the seed aging process. *Plants*, **8**, 1–13. <https://doi.org/10.3390/plants8060174>
- Kusumaningrum, D., Lee, H., Lohumi, S., Mo, C., Kim, M.S. and Cho, B.K. (2018) Non-destructive technique for determining the viability of soybean (*Glycine max*) seeds using FT-NIR spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **98**, 1734–1742. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8646>
- Marcos Filho, J. (1999) Teste de envelhecimento acelerado. In *Vigor de Sementes: Conceitos e Testes* (eds. F.C. Krzyzanowski, R.D. Vieira & J. de B. França Neto), p. 218, ABRATES, Londrina, PR.
- Marcos Filho, J. (2015) *Fisiologia de Sementes de Plantas Cultivadas.*, 2nd ed. Abrates, Londrina.
- de Medeiros, A.D., Bernardes, R.C., da Silva, L.J., de Freitas, B.A.L., Dias, D.C.F. dos S. and da Silva, C.B. (2021) Deep learning-based approach using X-ray images for classifying *Crambe abyssinica* seed quality. *Industrial Crops and Products*, **164**. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113378>
- de Medeiros, A.D., Capobianco, N.P., da Silva, J.M., da Silva, L.J., da Silva, C.B. and dos Santos Dias, D.C.F. (2020a) Interactive machine learning for soybean seed and seedling quality classification. *Scientific Reports*, **10**, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68273-y>
- de Medeiros, A.D., da Silva, L.J., Ribeiro, J.P.O., Ferreira, K.C., Rosas, J.T.F., Santos, A.A. and da Silva, C.B. (2020b) Machine learning for seed quality classification: An advanced approach using merger data from FT-NIR spectroscopy and x-ray imaging. *Sensors (Switzerland)*, **20**, 1–12. <https://doi.org/10.3390/s20154319>
- Mittler, R. (2017) ROS Are Good. *Trends in Plant Science*, **22**, 11–19.

- <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>
- Nakagawa, J. (1999) Testes de Vigor Baseados no Desempenho das Plântulas. In *Vigor de Sementes: Conceitos e Testes* (eds. F.C. Krzyzanowski, R.D. Vieira; & J. de B.F. Neto), p. 218, ABRATES, Londrina, PR.
- Noctor, G., Reichheld, J.P. and Foyer, C.H. (2018) ROS-related redox regulation and signaling in plants. *Seminars in Cell and Developmental Biology*, **80**, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.semdb.2017.07.013>
- Pereira, T., Coelho, C.M.M., Sobiecki, M. and Souza, C.A. (2015) Qualidade fisiológica de sementes de soja em função da dessecação pré-colheita. *Planta Daninha*, **33**, 441–450. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582015000300007>
- Pinheiro, D.T., Dias, D.C.F. dos S., de Medeiros, A.D., Ribeiro, J.P.O., da Silva, F.L. and da Silva, L.J. (2021) Weathering deterioration in pre-harvest of soybean seeds: Physiological, physical, and morpho-anatomical changes. *Scientia Agricola*, **78**. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2020-0166>
- Rajjou, L. and Debeaujon, I. (2008) Seed longevity: Survival and maintenance of high germination ability of dry seeds. *Comptes Rendus - Biologies*, **331**, 796–805. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2008.07.021>
- Rodrigues, M., Gomes-Junior, F.G. and Marcos-Filho, J. (2020) Vigor-S: System for Automated Analysis of Soybean Seed Vigor. *Journal of Seed Science*, **42**, 1–12.
- Sahu, B., Sahu, A.K., Thomas, V. and Naithani, S.C. (2017) Reactive oxygen species, lipid peroxidation, protein oxidation and antioxidative enzymes in dehydrating Karanj (*Pongamia pinnata*) seeds during storage. *South African Journal of Botany*, **112**, 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.06.030>
- Sano, N., Rajjou, L., North, H.M., Debeaujon, I., Marion-Poll, A. and Seo, M. (2016) Staying alive: Molecular aspects of seed longevity. *Plant and Cell Physiology*, **57**, 660–674. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcv186>
- Santos, C.M.R., Menezes, N.L. de and Villela, F.A. (2004) Alterações Fisiológicas E Bioquímicas Em Sementes De Feijão envelhecidas artificialmente. *Revista Brasileira de Sementes*, **26**, 110–119. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222004000100017>
- Sediyama, T., Silva, F. and Borém, A. (2015) *Soja: Do Plantio à Colheita*. (eds T Sediyama, F Silva, and A Borém). UFV, Viçosa, MG.
- Silva, L.J. da, Medeiros, A.D. de and Oliveira, A.M.S. (2019) SeedCalc, a new automated R software tool for germination and seedling length data processing. *Journal of Seed Science*,

- 41, 250–257. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v42n2217267>
- Souza, T.R., Araujo, M.E.V., Teixeira, I.R., Guerrero, M.C., Neto, S.P.S. and Corrêa, P.C. (2020) Physiological quality of conventional soybean cultivars of seeds as a function of pod position in plant canopy. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, **32**, 336–344. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2020.v32.i5.2100>
- Szareski, J., Zanatta, E., Koch, F., Aisenberg, G.R., Demari, H., Kehl, K., Pimentel, J.R., Carvalho, I.R., Nardino, M., Trombeta, H.W., Souza, V.Q. De, Garbin, E., Pedó, T. and Aumonde, T.Z. (2016) Pre-harvest desiccation and seed production in soybean crops harvest desiccation and seed production in soybean crops.
- Vergara, R., da Silva, R.N.O., Nadal, A.P., Gadotti, G.I., Aumonde, T.Z. and Villela, F.A. (2019) Harvest delay, storage and physiological quality of soybean seeds. *Journal of Seed Science*, **41**, 506–513. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v41n4222413>
- Vieira, R.D. and Krzyzanowski, F.C. (1999) Teste de condutividade elétrica. In *Vigor de Sementes: Conceitos e Testes* (eds. F.C. Krzyzanowski, R.D. Vieira & J. de B. França Neto), p. 218, ABRATES, Londrina, PR.
- Weerasekara, I., Sinniah, U.R., Namasivayam, P., Nazli, M.H., Abdurahman, S.A. and Ghazali, M.N. (2021) The influence of seed production environment on seed development and quality of soybean (*Glycine max* (L.) merrill). *Agronomy*, **11**. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071430>
- Yin, G., Xin, X., Song, C., Chen, X., Zhang, J., Wu, S., Li, R., Liu, X. and Lu, X. (2014) Activity levels and expression of antioxidant enzymes in the ascorbate-glutathione cycle in artificially aged rice seed. *Plant Physiology and Biochemistry*, **80**, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.03.006>
- Zanatta, E., Szareski, V.J., Carvalho, I.R., Koch, F., Pimentel, J.R., Troyjack, C., Dellagostin, S.M., Demari, G.H., Lautenchleger, F., Souza, V.Q. de, Martinazzo, E.G., Villela, F.A., Pedó, T. and Aumonde, T.Z. (2018) Pre-harvest Desiccation: Productivity and Physical and Physiological Inferences on Soybean Seeds During Storage. *Journal of Agricultural Science*, **10**, 354. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n6p354>
- Zanon, A.J., Streck, N.A., da Rocha, T.S.M., Alberto, C.M., Bartz, A.C., de Paula, G.M., Tomiozzo, R., da Costa, L.C., Fensterseifer, C.A., Tagliapietra, E.L., Cardoso, Â.P., Weber, P.S. and Bexaira, K.P. (2016) Growth habit effect on development of modern soybean cultivars after beginning of bloom in Rio Grande do Sul. *Bragantia*, **75**, 446–458. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.535>

- Zuffo, A.M., Aguilera, J.G., Carvalho, E.R. and Teodoro, P.E. (2020) Harvest times with chemical desiccation and the effects on the enzymatic expression and physiological quality of soybean seeds. *Revista Caatinga*, **33**, 361–370. <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n209rc>
- Zuffo, A.M., Santos, M.D.A. Dos, de Oliveira, I.C., Alves, C.Z., Aguilera, J.G. and Teodoro, P.E. (2019) Does chemical desiccation and harvest time affect the physiological and sanitary quality of soybean seeds? *Revista Caatinga*, **32**, 934–942. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n409rc>
- Zuffo, A.M., Zuffo Júnior, J.M., Zambiazzi, E.V. and Steiner, F. (2017) Physiological and sanitary quality of soybean seeds harvested at different periods and submitted to storage1. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, **47**, 312–320. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4747576>

## CONCLUSÃO GERAL

A dessecação em pré-colheita de plantas de soja realizada no estágio R7 pode originar sementes com características físicas desuniformes e baixa qualidade fisiológica. As principais observações nesse trabalho indicam que dessecações realizadas no estágio R7 provocam redução na produção, baixo acúmulo de matéria seca nas sementes, alta produção de sementes verdes e heterogeneidade no tamanho e formato das sementes.

Os cultivares Zeus, NS 5445 e Foco produziram sementes com qualidade distinta com influência, além do genótipo, do ambiente de produção. A dessecação realizada no estágio R7 gerou sementes de alta qualidade somente para o cultivar Foco, uma vez que as sementes foram produzidas no cerrado, onde sofreu com frequentes chuvas no período de colheita. Já para os cultivares NS 5445 e Zeus sementes de maior qualidade foram obtidas a partir da dessecação realizada em R7.3, ou quando as sementes foram colhidas em R8, sem dessecação. Essas sementes foram produzidas na região Sul do Brasil, onde ocorreu pouca frequência de chuvas no período da colheita. Apesar das precipitações no período de colheita terem forte efeito na qualidade das sementes, entendemos que a predição das condições ambientais deve ser levada em consideração na tomada de decisão sobre o momento ideal dessecação.

As redes neurais artificiais treinadas utilizando os dados de qualidade física e fisiológica das sementes foram eficientes para classificar o vigor dos lotes de sementes. Esses modelos reduzem a complexidade de interpretação para classificar a qualidade de sementes dessecadas. Certamente, mais estudos são necessários para investigar o poder dessa ferramenta para esta finalidade.

Em relação ao sistema de defesa antioxidativo, há redução na atividade das enzimas POX aos oito meses de armazenamento, independentemente do estágio de dessecação. As atividades enzimáticas da CAT e APX diferem com o cultivar e apresentam aumento com tratamentos de dessecação que deram origem sementes de maior qualidade fisiológica. A atividade da SOD não apresentou correlação com os testes de qualidade fisiológica de sementes dessecadas.