Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Sistema Vigor-S e processamento digital como componentes auxiliares de testes para avaliação do vigor de sementes de soja

Glória de Freitas Rocha Ribeiro

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

Piracicaba
2022

Glória de Freitas Rocha Ribeiro
Engenheira Agrônoma

Sistema Vigor-S e processamento digital como componentes auxiliares de testes para avaliação do vigor de sementes de soja

Orientador:
Prof. Dr. FRANCISCO GUILHIEN GOMES JUNIOR

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

Piracicaba
2022

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

Ribeiro, Glória de Freitas Rocha

Sistema Vigor-S e processamento digital como componentes auxiliares de testes para avaliação do vigor de sementes de soja / Glória de Freitas Rocha Ribeiro. - - Piracicaba, 2022.

117 p.

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

1. Análise de imagem 2. *Glycine max* (L.) Merrill 3. Potencial fisiológico 4. Visão computacional I. Título

DEDICATÓRIA

Agradeço a minha família em especial aos meus pais Luiz Antônio e Regina, pelo amor, pelo incentivo, por sempre confiaram em mim, e por nunca medirem esforços para investir em minha carreira mesmo com todas as dificuldades.

Ao meu irmão Guilherme, e a outros familiares que sempre torceram por mim, e ao meu namorado Pedro, por todo companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida e por sempre estar me guiando para os melhores caminhos.

Ao Programa de Pós-Graduação pela oportunidade de cursar o mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo concedida.

Ao orientador Professor Dr. Francisco Guilhien Gomes-Junior, pela orientação ao longo de todo mestrado, pelos conselhos, paciência, confiança e profissionalismo.

Ao Professor Dr. Júlio Marcos Filho, por todo conhecimento e ensinamentos para a execução desse trabalho! Obrigada!

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, em especial aos professores Dr. Silvio Moure Cicero, Dr. Júlio Marcos Filho, Dra. Ana Dionísia da Luz Coelho Novembre pelos ensinamentos na área de sementes.

Às empresas Lagoa Bonita Sementes, Sementes Tormenta e Sementes Limoeiro pelo fornecimento das sementes utilizadas neste trabalho.

Ao pesquisador da Embrapa Soja, Dr. José de Barros França Neto e sua equipe pela realização da análise do teste de tetrazólio.

À Eng. Agr. Ms. Helena M. C. P. Chamma, pela importante contribuição na execução dos testes.

Aos funcionários do Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Adilson, David, Hodair, João e Luiz Cláudio pelo conhecimento e apoio necessários.

A todos os amigos, que sempre me apoiaram, e que contribuíram para a conclusão desse trabalho, Abimael Santos, Andres Trujillo, Artur Silva, Carlos Queiroz, Fabiano França, Felipe Calzado, Karina Cuba, Letícia Betânia, Lívia Rohr, Nielsen Moreira, Mayara Rodrigues, Patrícia Galletti, Rafael Alves.

Ao Grupo de Tecnologia de Sementes da USP/ESALQ pelo conhecimento e auxílio durante todo o desenvolvimento do trabalho.

A todos meus sinceros agradecimentos,

Muito obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO **7**

ABSTRACT **8**

1. INTRODUÇÃO **9**

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **11**

2.1. Importância das sementes de soja e o potencial fisiológico 11

2.2. Determinação do vigor de sementes de soja 11

2.3. Determinação do vigor de sementes de soja utilizando a análise computadorizada de imagens de plântulas 14

3. MATERIAL E MÉTODOS **19**

3.1 Avaliações do desempenho das sementes 19

3.1.1. Teor de água 19

3.1.2. Germinação 19

3.1.3. Envelhecimento acelerado tradicional 20

3.1.4. Envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl 20

3.1.5. Condutividade elétrica 20

3.1.6. Tetrazólio 20

3.1.7. Emergência de plântulas em campo 21

3.1.8. Análise computadorizada de imagens de plântulas (Vigor-S) 21

3.1.8.1 Teste de vigor (Vigor-S) 21

3.1.8.2 Uso do Vigor-S para avaliação de plântulas após o teste de envelhecimento acelerado ... 22

3.1.9. Avaliação da protrusão da raiz primária (visual e utilizando a análise de imagens) 22

3.2. Análise Estatística 25

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO **27**

4.1. Primeira época de avaliação 27

4.1.1. Avaliação do potencial fisiológico das sementes 27

4.1.2. Avaliação da protrusão da raiz primária 38

4.2 Segunda época de avaliação 52

4.2.1. Avaliação do potencial fisiológico das sementes 52

4.1.2. Avaliação da protrusão da raiz primária 61

4.3. Terceira época de avaliação 75

4.3.1. Avaliação do potencial fisiológico das sementes 75

4.3.2. Avaliação da protrusão da raiz primária 84

5. ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE OS DESCRITORES MORFOLÓGICOS E A PROTRUSÃO DA RAIZ PRIMÁRIA **97**

5.1. Aspectos relacionados à precisão dos descritores morfológicos na caracterização da protrusão da raiz primária pelo *software* ImageJ 97

5.2. Correlação entre as avaliações de potencial fisiológico e atributos morfológicos visando a caracterização da protrusão da raiz primária correspondentes às três épocas experimentais 98

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS **107**

7. CONCLUSÕES **109**
REFERÊNCIAS **111**

RESUMO

Sistema Vigor-S e processamento digital como componentes auxiliares de testes para avaliação do vigor de sementes de soja

Para estimar o desempenho das sementes em campo é indispensável avaliar o vigor. Assim, procedimentos rápidos e precisos são altamente desejáveis para apoiar os programas de controle de qualidade de empresas de sementes. Uma alternativa disponível para a determinação do vigor de sementes é o uso de recursos computacionais com a possibilidade de reduzir limitações existentes em testes tradicionais. Este trabalho teve como objetivos (i) avaliar a eficiência do Sistema Análise Automatizada do Vigor de Sementes (Vigor-S) na análise de plântulas obtidas após o envelhecimento acelerado para determinar o vigor de sementes de soja; (ii) verificar a eficiência do *software* ImageJ para identificar a protrusão da raiz primária e sua associação com o vigor de sementes de soja. Foram utilizadas sementes de dois cultivares, HO Jacutinga IPRO representado por dez lotes e NS 7007 IPRO representado por nove lotes, com germinação semelhante e diferenças de vigor. As sementes foram avaliadas quanto à germinação e vigor (primeira contagem de germinação, condutividade elétrica, envelhecimento acelerado, protrusão da raiz primária, análise Vigor-S e emergência de plântulas em campo). Para verificar a viabilidade da utilização do Vigor-S como parte do procedimento para a condução do teste de envelhecimento acelerado, plântulas com três dias de idade, obtidas após a exposição das sementes ao envelhecimento acelerado (procedimento tradicional e com solução saturada de NaCl), foram digitalizadas e analisadas pelo Vigor-S, cujos resultados foram comparados com os provenientes de outros testes tradicionalmente utilizados para avaliação do vigor. Para avaliação da protrusão da raiz primária sementes de cada lote foram submetidas ao teste de germinação em diferentes condições de período e temperatura: 30 e 48 horas a 20 °C; 24 e 30 horas a 25 °C; 24 e 30 horas a 30 °C. Após a contabilização do número de sementes com protrusão da raiz primária foi realiza a captura das imagens para serem analisadas pelo *software* ImageJ, visando a identificação de parâmetros morfológicos para caracterizar a protrusão da raiz primária. A análise da variância dos dados referentes a cada cultivar e teste foi conduzida de acordo com delineamento inteiramente casualizado, com exceção dos dados de emergência de plântulas em campo, que foram analisados de acordo com delineamento de blocos ao acaso. As médias foram comparadas pelo teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$). A análise de componentes principais foi realizada pelo *software* R. Verificou-se eficiência das análises Vigor-S obtidas após o teste de envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl, permitindo a discriminação dos lotes de sementes quanto ao vigor de maneira semelhante a outros testes tradicionalmente utilizados para sementes de soja. Os parâmetros perímetro e área não foram seguros para caracterizar a protrusão da raiz primária. Os parâmetros circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity* foram eficientes para caracterizar a protrusão da raiz primária em ambos os cultivares. Os tratamentos 25 °C / 30h, 30 °C / 24h e 30 °C / 30h proporcionaram a melhores condições para a protrusão da raiz primária e discriminação dos lotes do cultivar HO Jacutinga IPRO, enquanto que para o cultivar NS 7007 IPRO o melhor tratamento foi 25 °C / 24h. Concluiu-se que o sistema Vigor-S pode ser utilizado na avaliação de plântulas originadas do teste de envelhecimento acelerado, apresentado resultados consistentes para discriminação dos lotes quanto ao vigor. Os parâmetros de circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity* obtidos pelo *software* ImageJ possibilitam a identificação da protrusão da raiz primária, contribuindo para uma avaliação rápida e menos subjetiva do vigor de lotes de sementes de soja.

Palavras-chave: análise de imagens, *Glycine max* (L.) Merrill, potencial fisiológico, visão computacional

ABSTRACT

Vigor-S system and digital processing as auxiliary test components for evaluation of soybean seed vigor

To estimate the performance of seeds in the field, it is essential to evaluate the vigor. Thus, fast and accurate procedures are highly desirable to support the quality control programs of seed companies. An alternative available for determining seed vigor is the use of computational resources with the possibility of reducing existing limitations in traditional tests. The objectives of this work (i) were to evaluate the efficiency of the Automated Seed Vigor Analysis System (Vigor-S) in the analysis of seedlings obtained after accelerated aging to determine soybean seed vigor; (ii) verify the efficiency of the ImageJ software to identify the protrusion of the primary root and its association with the vigor of soybean seeds. Seeds of two cultivars were used, HO Jacutinga IPRO represented by ten lots and NS 7007 IPRO represented by nine lots, with similar germination and vigor differences. The seeds were evaluated for germination and vigor (first count of germination, electrical conductivity, accelerated aging, primary root protrusion, Vigor-S analysis and seedling emergence in the field). To verify the feasibility of using Vigor-S as part of the procedure for conducting the accelerated aging test, three-day-old seedlings obtained after seed exposure to accelerated aging (traditional procedure and saturated NaCl solution), were digitized and analyzed by Vigor-S, whose results were compared with those from other tests traditionally used to evaluate vigor. To evaluate the protrusion of the primary root, seeds from each lot were germinated in different conditions of period and temperature: 30 and 48 hours at 20 °C; 24 and 30 hours at 25 °C were evaluated and the periods of 30 and 48 hours at 20 °C, 24 and 30 hours at 25 °C, and 24 and 30 hours at 30 °C were evaluated. After accounting for the number of seeds with primary root protrusion, the images were captured to be analyzed by the ImageJ software, aiming at the identification of morphological parameters to characterize the protrusion of the primary root. The analysis of the variance of the data referring to each cultivar and test was conducted according to a completely randomized design, except for the emergency data of seedlings in the field, which were analyzed according to a randomized block design. The means were compared by the Scott Knott test ($p < 0.05$). Principal component analysis was performed by software R. It was verified efficiency of vigor-S analyses obtained after the traditional accelerated aging test and saturated NaCl solution, allowing the discrimination of seed lots in a similar way to other tests traditionally used for soybean seeds. The perimeter and area parameters were not safe to characterize the protrusion of the primary root. The parameters circularity, aspect ratio, roundness and solidity were efficient to characterize the protrusion of the primary root in both cultivars. Thus, the treatments 25 °C / 30h, 30 °C / 24h and 30 °C / 30h showed better efficiency to identify the protusion of the primary root of the lots of cultivar A. For cultivar B, the treatment 25 °C / 24h showed better efficiency for characterization of the primary root. It was concluded that the Vigor-S system can be used in the evaluation of seedlings originated from the accelerated aging test, presented consistent results for batch discrimination regarding vigor. The parameters of circularity, aspect ratio, roundness and solidity obtained by the ImageJ software allow the identification of the protrusion of the primary root, contributing to a rapid and less subjective evaluation of the vigor of soybean seed lots.

Keywords: image analysis, *Glycine max* (L.) Merrill, Physiological potential, computer vision

1. INTRODUÇÃO

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] apresenta grande importância econômica para o Brasil, sendo o maior produtor mundial apresentando uma produção de 135,409 milhões de toneladas e área plantada de 38,502 milhões de hectares (Conab, 2021). A alta tecnologia investida nas sementes de soja permitiu a semeadura em todo o território nacional com a escolha de sementes certificadas de alta germinação e vigor, é possível garantir altas produtividades.

O controle de qualidade de sementes de soja está cada vez mais eficiente e dinâmico, principalmente em função da competitividade do mercado, tornando crescentes os investimentos nessa área. Devido à importância dessa cultura são necessários cuidados desde a produção até a comercialização dessas sementes. No controle de qualidade de sementes de soja é indispensável a execução de testes de germinação e de vigor. O teste de germinação é realizado em laboratório sob condições ideais e em ambiente controlado para determinar o potencial máximo de germinação de um lote.

Os testes de vigor visam complementar as informações do teste de germinação, permitindo identificar diferenças no desempenho dos lotes de sementes em condições menos favoráveis de ambiente. Dentre os testes de vigor o teste de envelhecimento acelerado tem sido frequentemente utilizado para identificar diferenças de vigor entre lotes de sementes de soja. Porém, quando o teste é conduzido utilizando solução saturada de NaCl, há maior controle da taxa de absorção de água pelas sementes, cujos teores se mantém próximo de 11 a 13% e, consequentemente, maior aproximação das condições normais de armazenamento (Marcos-Filho, 2015).

A avaliação do vigor de sementes por meio da análise computadorizada de imagens de plântulas também tem se mostrado eficiente, pois permite a obtenção e resultados de forma rápida, precisa e com baixo custo de execução. Um dos sistemas computadorizados desenvolvidos recentemente é o Sistema Análise Automatizada do Vigor de Sementes (Vigor-S), que fornece informações sobre o potencial fisiológico das sementes foi desenvolvido para comparação direta do vigor de diferentes lotes de sementes. Ainda, pode ser utilizado como complemento de informação de outros testes de vigor, como o envelhecimento acelerado tradicional ou com solução saturada de NaCl, sendo assim, apresenta informações sobre o desempenho das plântulas em menor tempo de avaliação, maior sensibilidade na classificação de lotes com semelhanças no potencial fisiológico e diminui a subjetividade inerente ao analista.

O procedimento básico para avaliar o vigor de sementes de soja pelo teste de envelhecimento acelerado já está estabelecido; no entanto, é necessário aprimorar constantemente a metodologia sem prejudicar sua eficiência, ou incluir alternativas inovadoras. Assim, a determinação do crescimento de plântulas de soja utilizando o sistema Vigor-S, após a germinação das sementes expostas às condições do teste de envelhecimento acelerado, poderá fornecer informações valiosas sobre o desempenho de lotes, em menor tempo em comparação com a determinação do percentual de plântulas normais após

quatro ou cinco dias de germinação. Além de permitir a redução do período necessário para obtenção dos resultados do teste de envelhecimento acelerado, o sistema Vigor-S proporciona maior rapidez na computação das plântulas normais e redução da interferência humana. Ainda, há de se considerar a maior consistência nas informações, devido à padronização, precisão e objetividade inerentes à análise automatizada.

Outro método que pode ser utilizado para avaliação do vigor de sementes é a determinação da protrusão da raiz primária. Plântulas que apresentam precocidade na protrusão da raiz primária estão associadas com maior vigor, ou seja, desenvolvem mais rápido quando comparadas com as de menor vigor. Porém, quando realizado mediante a análise visual, torna-se um procedimento demorado e sujeito a variabilidade de resultados, principalmente quando realizado por diferentes analistas. Assim, uma possibilidade para suprir essas limitações é a utilização de recursos computacionais para caracterização da protrusão da raiz primária.

A utilização do *software* ImageJ como ferramenta para dimensionar as imagens de sementes por meio dos parâmetros morfológicos, como área, perímetro, circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity*, caracteriza mudanças de forma das sementes durante o processo de germinação, a fim de identificar a protrusão da raiz primária e, por meio da comparação com os testes tradicionais, associar com o vigor de sementes.

Nesse contexto, os objetivos desta pesquisa foram: (i) avaliar a eficiência do Sistema Análise Automatizada do Vigor de Sementes (Vigor-S) na análise de plântulas obtidas após o envelhecimento acelerado para determinar o vigor de sementes de soja; (ii) verificar a eficiência do *software* ImageJ utilizando atributos morfodimensionais para identificar a protrusão da raiz primária e sua associação com o vigor de sementes de soja.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Importância das sementes de soja e o potencial fisiológico

A constituição química, qualidade inicial, teor de água, condições ambientais e presença de fungos e insetos durante o armazenamento são fatores que afetam o potencial fisiológico das sementes (Carvalho e Nakagawa, 2000). Grieshop e Fahey, (2001), avaliaram diferentes cultivares de soja do Brasil, China e Estados Unidos e verificaram quantidades de proteínas de 39,4 a 42,3%, lipídios 18,0 a 19,8%, fibras 11,5 a 17,1% e minerais 4,9 a 5,2%. A disponibilidade de nutrientes afeta a qualidade de planta produtoras de sementes que reflete na formação do embrião, dos órgãos de reserva e na composição química das sementes, e consequentemente, o vigor das sementes (Carvalho e Nakagawa, 2000).

Em função de suas características morfológicas e fisiológicas, as sementes de soja são muito propensas à deterioração e sensíveis a adversidades ambientais durante a maturação e a práticas inadequadas de manejo durante a colheita, processamento e armazenamento (Marcos-Filho, 2015a). A deterioração se manifesta através de diversas alterações fisiológicas, como redução da velocidade de germinação e do crescimento de plântulas, desuniformidade no desenvolvimento, perda de vigor, entre outras.

O atributo fisiológico da qualidade, caracterizado pelo potencial fisiológico das sementes, é determinado utilizando-se testes de germinação e vigor. No processo de produção de sementes, pré e pós-colheita, a utilização de testes de vigor é fundamental para a avaliação do potencial fisiológico e assegurar a implantação adequada da cultura no campo (Scheeren *et al.*, 2010).

Embora os testes de vigor sejam capazes de detectar variações relativamente estreitas no estádio de deterioração de lotes de sementes com germinação semelhante (Baalbaki *et al.*, 2009), os programas internos de controle de qualidade das empresas buscam avaliar o potencial fisiológico de sementes com base na interpretação conjunta dos resultados de dois ou mais testes, cujos princípios se relacionem diretamente aos objetivos pretendidos (TeKrony, 2003). Assim, o uso de testes de vigor com sensibilidade suficiente para viabilizar a comercialização de lotes de sementes com maior possibilidade de apresentar bom desempenho no campo tem sido a principal estratégia dos produtores mais experientes (Costa *et al.*, 1994).

Portanto, além de facilitar o manejo de lotes de sementes e definir se os lotes serão comercializados ou descartados, os testes de vigor fornecem informações sobre o comportamento das sementes em situações específicas como a secagem, beneficiamento e armazenamento, auxiliando na tomada de decisões durante todas as etapas de produção de sementes (Marcos-Filho, 2015a).

2.2. Determinação do vigor de sementes de soja

Na avaliação do vigor de sementes de soja diversos testes têm sido recomendados, destacando-se os de tetrazólio, condutividade elétrica, crescimento de plântulas e envelhecimento acelerado (Vieira

et al., 2003). O teste de emergência de plântulas em campo também tem sido utilizado, porém, segundo Marcos-Filho (2020), apresenta maior dificuldade de padronização de procedimentos por ser conduzido em condições naturais de ambiente, sujeito a variações nas condições ambientais entre regiões e épocas do ano, em uma mesma região.

O teste de tetrazólio é um dos mais utilizados para avaliação de sementes de soja no Brasil. Isso deve-se à rapidez e eficiência na caracterização da viabilidade e do vigor; a avaliação da ocorrência de injúrias provocadas pela deterioração por "umidade", de injúrias mecânicas, de injúrias causadas por percevejos e durante o processo de secagem, auxilia no processo de controle de qualidade durante as etapas de colheita, transporte, beneficiamento e armazenamento de sementes de soja (Costa, 1994; Costa *et al.*, 1998). Uma das principais vantagens do teste de tetrazólio é a avaliação das sementes em poucas horas, mas há também algumas limitações como a necessidade de pessoas capacitadas para conduzi-lo (Costa, 1994). De acordo com Zorato (2001) o teste de tetrazólio está sendo utilizado desde a pré colheita até a semeadura, e tem função de monitorar e diagnosticar diferentes lotes de sementes de soja.

O teste de condutividade elétrica é considerado eficiente para avaliação do vigor de sementes de soja, visto que apresenta base teórica consistente, objetividade, rapidez, facilidade de execução e possibilidade de ser padronizado como teste rotineiro devido sua reprodutibilidade (França-Neto e Krzyzanowski, 2020). Vieira *et al.* (2002), verificaram que o teste de condutividade elétrica é eficiente e rápido para detectar alterações no potencial fisiológico em sementes de soja. Neste teste, o vigor está diretamente relacionado com a integridade das membranas celulares resultantes do processo de deterioração.

No teste de condutividade elétrica realizado pelo método de massa, a partir dos resultados das leituras das amostras de sementes, após certo período de imersão em água, permitirá avaliar o nível de vigor da amostra. No Brasil o teste de condutividade elétrica tem sido estudado e apresentado resultados eficientes na avaliação do vigor de lotes de sementes de soja (Baalbaki *et al.*, 2009). A *International Seed Testing Association* (ISTA, 2020) considera padronizado o método de massa do teste de condutividade elétrica para sementes de grão-de-bico, soja, feijão, ervilha (apenas ervilha de jardim) e rabanete.

Dentre os diversos testes para avaliar o vigor de sementes, o teste de envelhecimento acelerado é um dos mais utilizados no Brasil e no mundo, particularmente para as sementes de milho e soja (Marcos-Filho, 2020). O teste de envelhecimento acelerado indica a resposta das sementes a condições de estresse, com temperatura e umidade relativa do ar elevadas, promovendo diferenciações mais sensíveis que o teste de germinação (Marcos-Filho, 2015a). Relataram a eficiência do teste de envelhecimento acelerado tradicional na aferição do vigor de sementes de soja a 42 °C / 48 horas (Dutra; Vieira, 2004).

Um aspecto importante nesse teste são as diferenças na intensidade e velocidade de absorção de água pelas sementes que, expostas à atmosfera úmida, podem apresentar variações acentuadas no teor de água (Torres, 2005), podendo interferir na consistência dos resultados, principalmente em sementes

relativamente pequenas, como as de hortaliças (Powell, 1995). A atividade de microrganismos durante o teste de envelhecimento acelerado é outro inconveniente, pois prejudica a germinação e o desenvolvimento de plântulas, provocando incertezas quanto à sua normalidade e dificultando a interpretação dos resultados (Marcos-Filho, 2015).

Visando evitar esses problemas durante a condução do teste, Jianhua e McDonald (1997) desenvolveram um procedimento de envelhecimento com a exposição das sementes a solução saturada de sal, em substituição à água. Nesse procedimento, a umidade relativa do ambiente onde as sementes são mantidas utilizando solução saturada de sal (NaCl: 76%, KCl: 87% ou NaBr: 55% de U.R.) é inferior à mantida no teste tradicional, uniformizando e reduzindo a velocidade de absorção de água pelas sementes e a intensidade da deterioração. Dentre as vantagens do envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl destaca-se a uniformização do teor de água das sementes, atingindo em torno de 11 a 14% ao final do período de envelhecimento, ou seja, mais próximo do verificado durante o armazenamento das sementes da maioria das espécies cultivadas, enquanto ao procedimento tradicional, situam-se entre 25% e 28% (Marcos-Filho, 2015). Várias pesquisas já comprovaram a eficiência do teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl para avaliação do vigor de sementes de soja (Marcos-Filho, Novembre, Chamma, 2001; Marcos-Filho *et al.*, 2009; Yagushi *et al.*, 2014; Rodrigues *et al.*, 2020).

Com relação aos testes que avaliam o crescimento de plântulas, a determinação do comprimento médio das plântulas normais ou de suas partes, as amostras que apresentam os maiores valores médios são as mais vigorosas; as sementes vigorosas proporcionam maior taxa de transferência de massa seca de seus tecidos de reserva para o eixo embrionário, na fase de germinação, originando plântulas com maior peso, em função do maior acúmulo de matéria seca (Krzyzanowski *et al*., 2020). Estes testes são sugeridos pelas duas associações mundiais (AOSA – *Association of Official Seed Analysts* / ISTA – *International Seed Testing*), e também, pela ABRATES – Associação Brasileira de Tecnologia de Sementes.

Para sementes de soja, a avaliação do comprimento médio de plântulas ou de suas partes foi eficiente para classificar lotes com diferenças sutis de vigor (Vanzolini *et al.*, 2007); os autores observaram que a determinação do comprimento da raiz foi o parâmetro mais adequado para identificar diferenças de vigor, apresentando relação estreita com a emergência de plântulas em campo.

Embora os procedimentos para avaliação do crescimento de plântulas proporcionem informações úteis para a determinação do vigor de sementes, sua utilização ainda não é uma realidade na maioria dos laboratórios das empresas produtoras de sementes de soja no Brasil. O elevado consumo de tempo para efetuar as determinações com auxílio de régua e a ampla variabilidade de resultados entre analistas são as principais limitações para que essas análises sejam incluídas na rotina dos laboratórios. Uma das alternativas para conferir maior rapidez e consistência às informações obtidas, com redução da interferência humana, é o uso da análise computadorizada de imagens.

Na análise do crescimento de plântulas, o período e a quantidade de energia consumidos para a reativação do metabolismo, atividade de mecanismos de reparo de membranas e retomada da síntese de DNA e de proteínas, influenciam o momento da protrusão da raiz primária, podendo ser precoce ou mais tardia, dependendo do vigor da semente (Matthews *et al.,* 2007 e 2010). Assim, um dos procedimentos que tem sido estudados nos últimos anos para determinação do vigor de sementes é a avaliação da precocidade da protrusão da raiz primária.

O primeiro trabalho visando a determinação da precocidade da protrusão da raiz primária como teste de vigor provavelmente foi realizado em sementes de milho (Toledo *et al.,* 1999). Posteriormente, outros pesquisadores também comprovaram e eficiência deste procedimento para avaliação do vigor de sementes dessa espécie (Matthews e Khajeh-Hosseini, 2006 e 2007; Pereira *et al.,* 2008; Alvarenga *et al.,* 2013) e de outras espécies como tomate (Martinelle-Seneme *et al.,* 2004; Ermis *et al.,* 2015, Oliveira *et al.,* 2021), pimenta (Demir *et al.,* 2008), colza (Matthews *et al.,* 2012) e soja (Gomes *et al.,* 2018). O teste baseia-se no princípio de que as sementes com maior vigor emitem a raiz primária mais rapidamente do que menos vigorosas, quando se comparam diferentes lotes (Pereira *et al.,* 2012), indicando a eficiência da ação dos mecanismos de reparo.

Pesquisa recente com sementes de soja revelou eficiência da avaliação da protrusão da raiz primária (48 h a 25 °C) na determinação do vigor, apresentando eficiência semelhante à dos testes de envelhecimento acelerado e emergência de plântulas em areia (Gomes *et al.,* 2018).

2.3. Determinação do vigor de sementes de soja utilizando a análise computadorizada de imagens de plântulas

Nos últimos anos, a análise de imagens de sementes e plântulas tem sido eficiente para a avaliação dos componentes fisiológicos e físicos de sementes, que influenciam na qualidade dos lotes (Silva *et al.,* 2013). É considerada uma atividade dinâmica, caracterizada pela melhoria contínua do desenvolvimento e padronização da metodologia (Nunes *et al.,* 2014). Segundo Carvalho (2010), os sistemas de análise de imagens são mais atraentes na avaliação automática de diferentes aspectos da qualidade das sementes, pois há rapidez na detecção de imagens digitais e no processamento de dados informatizados.

Um dos sistemas computadorizados que apresentou uma aplicação bastante expressiva em estudos do vigor de sementes foi o proposto por Sako *et al.* (2001). O sistema, denominado *Seed Vigor Imaging System* (SVIS®), forneceu informações sobre o comprimento da raiz primária, do hipocótilo, das plântulas e da relação raiz/hipocótilo e o índice de vigor das sementes de alface após o processamento das imagens em computador, considerando, também, a velocidade e a uniformidade de desenvolvimento das plântulas. Posteriormente, o *software* foi utilizado por vários pesquisadores para para determinação do vigor de sementes de outras espécies como soja (Hoffmaster *et al.,* 2003; Marcos-Filho *et al.,* 2009; Santos *et al.,* 2011), milho (Otoni; McDonald, 2005; Mondo *et al.,* 2011), amendoim (Marchi *et al.,* 2011), feijão (Gomes-Junior *et al.,* 2014), dentre outras.

Recentemente, a partir de uma parceria entre a USP/ESALQ e a Embrapa Instrumentação Agropecuária (CNPDIA), com o suporte da FAPESP, foi desenvolvido o sistema Análise Automatizada do Vigor de Sementes (Vigor-S), cujo princípio é o mesmo concebido para o SVIS®. Diferentemente do SVIS®, o sistema Vigor-S está disponível gratuitamente, via *link* (https://drive.google.com/open?id=0B8rVh_veepVzdXM0MlJ1M0I0ZEk), o que torna possível sua utilização por todos os interessados.

A eficiência do Vigor-S na avaliação do vigor foi comprovada para sementes de milho (Castan *et al.*, 2018), feijão (Medeiros *et al.*, 2019), feijão-caupi (Rego, 2021), melão (Leite, 2020) e soja (Rodrigues *et al.*, 2020). Em sementes de soja, os resultados revelaram consistência da análise Vigor-S na identificação de lotes de sementes de maior e de menor vigor, em comparação aos resultados do teste de emergência de plântulas em campo e de outros testes de vigor tradicionalmente utilizados, como o teste de envelhecimento acelerado e o teste de tetrazólio (Rodrigues *et al.*, 2020).

Ainda, o potencial de utilização da análise computadorizada de imagens de plântulas não se restringe à comparação direta do vigor de diferentes lotes, pois há possibilidade de sua introdução como complemento de outros testes como, por exemplo, o teste de envelhecimento acelerado, o teste de germinação a baixa temperatura e o teste de frio. Marcos-Filho *et al.* (2009) observaram sensibilidade da avaliação do crescimento de plântulas pela análise computadorizada de imagens (SVIS®) após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl na determinação do vigor de sementes de soja. De maneira semelhante, em sementes de milho, Dias *et al.* (2015) observaram eficiência na classificação do vigor pela determinação computadorizada do comprimento de raiz primária de plântulas com dois dias de idade, após o teste de envelhecimento acelerado. Ermis *et al.* (2015) verificaram que a avaliação da protrusão da raiz primária após o teste de deterioração controlada, ao invés da contagem final de plântulas normais, pode fornecer resultados mais rapidamente para avaliação do vigor de sementes de tomate.

A avaliação do vigor de sementes, como rotina nos laboratórios das empresas produtoras de sementes, tem evoluído à medida que os testes disponíveis vêm sendo aperfeiçoados, permitindo a obtenção de resultados consistentes e reproduzíveis (Martins *et al.*, 2002), assim como há introdução de novos procedimentos.

Outra abordagem que merece atenção da pesquisa na determinação do vigor de lotes de sementes é a possível utilização de recursos computacionais para a avaliação da precocidade da protrusão da raiz primária. Segundo Matthews e Khajeh-Hosseini (2006), o teste de precocidade da protrusão da raiz primária destaca-se por possuir as características necessárias de um teste de vigor, ou seja, rápido e de simples execução.

A utilização de testes com análise de imagens consiste na captura da imagem para geração de dados dimensionais, como o comprimento e a área das sementes (Dell'Aquila, 2009; Varma e Durga e Keshaulum, 2013), entre outros parâmetros como perímetro, circularidade e *aspect ratio* que caracterizam a protrusão.

Dessa forma, o parâmetro circularidade, como descritor de variação de forma de semente, foi usado para estabelecer o início da protrusão da raiz primária em sementes de repolho, lentilha, pimenta e tomate (Dell'Aquila, 2004a).

Para mensurar as dimensões de imagens tem sido frequente o uso de *softwares* de livre acesso, como por exemplo o ImageJ, desenvolvido por Waybe Rasband do *National Institutes of Health*; o *software* possui recursos para analisar os parâmetros das sementes, como área, largura, comprimento, perímetro, entre outros. Em pesquisa realizada com sementes de *Acca sellowiana* a utilização do ImageJ permitiu mensurar áreas livres no interior de sementes, a partir de imagens radiográficas, associando com a germinação (Silva *et al.*, 2013). O *software* ImageJ também foi utilizado eficientemente na determinação de áreas livres e da relação de aspecto (*aspect ratio*) a partir de imagens radiográficas durante a maturação de sementes de quiabo, permitindo identificar valores de cada um desses parâmetros associados com o potencial fisiológico máximo (Santos *et al*., 2020).

Utilizando o *software* ImageJ Oliveira *et al.* (2021) concluiu que através do processamento de imagens com base na relação de aspecto (*aspect ratio*) é eficiente para caracterizar a emergência da raiz primária na avaliação do vigor de sementes de tomate.

Dell'Aquila *et al.* (2000), utilizando técnicas de análise de imagens e descritores morfológicos, como a área das sementes para descrever as alterações no tamanho, constaram alta sensibilidade e acurácia desse parâmetro para monitorar a germinação e identificar o momento da protrusão da raiz primária de sementes de repolho. Škrubej *et al.* (2015) também verificaram que o sistema computacional baseado no processamento de imagens é capaz de mensurar com acurácia de 95,44% da germinação das sementes de tomate, com potencial para integrar-se às avaliações de laboratório realizadas tradicionalmente.

De maneira semelhante, pesquisa realizada com sementes de *Brassica napus* revelou eficácia da visão computacional no ranqueamento de lotes quanto ao vigor, baseando-se na determinação da protrusão da raiz primária, por meio da captura de imagens para obtenção de curvas do tempo médio de germinação, período caracterizado pelo início da embebição até a germinação das sementes, a qual a emergência radicular tardia resulta em sementes de menor vigor (Matthews *et al.*, 2012).

Por meio da determinação da precocidade da protrusão da raiz primária é possível avaliar o vigor de um lote de sementes com eficiência e em menor tempo, quando comparado com outros testes. Embora existam trabalhos com outras espécies, para as sementes de soja ainda não foram desenvolvidas pesquisas utilizando atributos morfodimensionais obtidos pela análise computadorizada, que permitam caracterizar a protrusão da raiz primária, na determinação do vigor.

O uso de *software* para automatizar a avaliação da protrusão da raiz primária é um assunto que está sendo explorado pela pesquisa (Geneve e Kester, 2001; Matthews e Powell, 2011). Neste contexto, as novas ferramentas computacionais para avaliação do potencial fisiológico das sementes de soja por meio da análise de imagem poderão contribuir para avaliação de forma rápida e eficiente, por meio da comparação dos resultados de diversos parâmetros morfológicos e associar com a protrusão da raiz

primária. Assim como, o primeiro trabalho realizado para a determinação da precocidade da protrusão da raiz primária como teste de vigor, se destaca por ser um teste rápido, de fácil execução, características para um bom teste de vigor (Toledo *et al*., 1999). A análise de imagem auxiliou métodos mais populares na determinação da germinação automatizada e teste de vigor (Dell'Aquila, 2009).

3. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada nos Laboratórios de Análise de Sementes e de Análise de Imagens do Departamento de Produção Vegetal (LPV) da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (Esalq), Universidade de São Paulo (USP), em Piracicaba, São Paulo.

Foram utilizadas sementes de dois cultivares de soja, HO Jacutinga IPRO e NS 7007 IPRO, sendo o primeiro representado por dez lotes e, o segundo, por nove lotes, com germinação semelhante, diferenças de vigor e não submetidas a tratamento químico.

Para determinação da variação do tamanho das sementes componentes dos lotes de cada cultivar foi realizado o teste de uniformidade (Brasil, 2009). Para tanto, duas amostras de 200 g de cada lote e cultivar foram submetidas a um conjunto de peneiras metálicas de crivos oblongos, superpostas em ordem decrescente, de 18 x 3/4'' (7,14 x 19,05 mm) a 10 x 3/4'' (3,96 x 19,05 mm), respeitando-se a diferença de 1/64'' (0,4 mm) entre a largura dos crivos de cada peneira. Ao final, cada fração retida por peneira foi pesada (precisão de 0,1 g), efetuando-se a determinação das porcentagens de retenção e identificação do tamanho médio das sementes de cada lote. O trabalho foi conduzido com materiais 14 x 3/4'' (6,35 x 19,05 mm) +/- 1/64'' (0,4 mm), representando o tamanho médio das sementes de cada lote.

A pesquisa foi conduzida em três épocas experimentais, com intervalos aproximadamente trimestrais, visando verificar a consistência dos resultados. As sementes foram armazenadas em sacos de papel, em câmara fria e seca, a 10 °C e 30% de umidade relativa do ar durante todo o período experimental, visando evitar o progresso acentuado da deterioração.

3.1 Avaliações do desempenho das sementes

3.1.1. Teor de água

Determinado pelo método da estufa a 105 ± 3 °C por 24 horas (Brasil, 2009), com duas amostras de 5 g de sementes para cada lote. Os resultados foram expressos em porcentagem média (base úmida) por lote. Essa determinação também foi realizada após a exposição das sementes às condições do teste de envelhecimento acelerado.

3.1.2. Germinação

Para cada tratamento, foram utilizadas 200 sementes, divididas em quatro repetições de 50 sementes cada, por lote, distribuídas em rolos de papel-toalha umedecido com quantidade de água, equivalente a 2,5 vezes a massa do papel seco. Os rolos com as sementes foram mantidos em germinador a 25 ºC. As avaliações foram realizadas aos quatro (primeira contagem de germinação) e sete dias após a semeadura. A interpretação do teste foi realizada conforme os critérios estabelecidos nas Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009) e, os resultados, expressos em porcentagem média de plântulas normais para cada lote.

3.1.3. Envelhecimento acelerado tradicional

Para cada tratamento foram utilizadas 200 sementes, divididas em quatro repetições de 50 sementes cada, por lote. O teste foi conduzido utilizando-se caixas de plástico (11 cm x 11 cm x 3,5 cm) com compartimentos individuais (minicâmaras), possuindo no seu interior uma tela metálica sobre a qual foram distribuídas as sementes de maneira a formar camada única. No interior de cada caixa foram adicionados 40 ml de água. As caixas foram mantidas em câmara de envelhecimento tipo incubadora com jaqueta d'água, a 41 °C, durante 48 horas. Após esse período foi conduzido o teste de germinação conforme descrito no item 3.1.2, sendo a avaliação realizada aos quatro dias após a semeadura, conforme Marcos-Filho (2020).

3.1.4. Envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl

Foi conduzido conforme o procedimento descrito para o teste de envelhecimento acelerado tradicional (item 3.1.3.); porém substituiu-se o volume de água adicionado às caixas por 40 ml de solução saturada de NaCl, a 41 °C, durante 72 horas (Marcos-Filho, 2020). Após esse período foi conduzido o teste de germinação conforme descrito no item 3.1.2, sendo a avaliação realizada aos quatro dias após a semeadura.

3.1.5. Condutividade elétrica

Foram utilizadas quatro repetições de 50 sementes para cada lote, pesadas em balança de precisão (0,01 g) e colocadas em copos de plástico de 200 ml, preenchidos com 75 ml de água deionizada. Os copos foram mantidos em câmara de germinação por 24 horas a 25 ºC. Ao final deste procedimento foi aferida a leitura da condutividade elétrica da solução, utilizando o condutivímetro Digimed, modelo DM-32. Os dados obtidos nas leituras de cada repetição foram divididos pelo peso inicial, expressos em $\mu S.cm^{-1}.g^{-1}$ de sementes (Vieira, Marcos Filho, 2020).

3.1.6. Tetrazólio

Foram utilizadas 150 sementes (3 subamostras com 50 sementes de cada lote, e de cada cultivar). As sementes foram pré-condicionadas em papel-toalha, previamente umedecido com quantidade de água equivalente a 2,5 vezes a massa do papel seco, e mantidas em germinador, a 25 ºC durante 16 horas. As sementes foram colocadas em copos de plástico contendo 50 ml de solução de cloreto de 2,3,5 trifenil tetrazólio a 0,075%, e mantidas em estufa, a 40 ºC, durante 3 horas, para o desenvolvimento da coloração, de acordo com França-Neto e Krzyzanowski (2020). As sementes foram lavadas com água corrente e mantidas submersas em água até a avaliação.

As avaliações de vigor e viabilidade foram interpretadas conforme os critérios de França-Neto e Krzyzanowski (2020), a qual cada semente é enquadrada nas classes de 1 a 5, caso viáveis, e de 6 a 8,

se não viáveis; e o nível de viabilidade é identificado em ordem crescente de defeitos nas sementes. Os índices de vigor consideram as sementes nas classes de 1 a 3, e a viabilidade as classes de 1 a 5.

3.1.7. Emergência de plântulas em campo

Foram utilizadas quatro repetições de 50 sementes, cada uma representada por um sulco de 4 m de comprimento, com 7 cm de profundidade e espaçado de 40 cm. As sementes foram distribuídas de maneira equidistante e cobertas com 3 cm de terra. O solo foi irrigado por aspersão, conforme a necessidade. O número de plântulas emersas foi registrado diariamente para determinar o índice de velocidade de emergência, conforme a fórmula proposta por Maguire (1962). Nas avaliações diárias foram computadas as plântulas que atingiram o estádio VC, ou seja, com os cotilédones acima da superfície do solo e folhas unifoliadas com as margens não mais se tocando, de acordo com a caracterização realizada por Costa e Marchezan (1982). Aproximadamente aos 15 dias após a semeadura, quando ocorreu a estabilização na emergência das plântulas, foi calculada a porcentagem de emergência de plântulas, obtendo-se valores médios por lote e cultivar (Krzyzanowski *et al*., 2020).

3.1.8. Análise computadorizada de imagens de plântulas (Vigor-S)

3.1.8.1 Teste de vigor (Vigor-S)

Foi realizada com utilização do *software* Vigor-S, com cinco repetições de 20 sementes por lote de cada cultivar. Foram distribuídas duas fileiras com 10 sementes no terço superior de duas folhas de papel-toalha e cobertas com uma terceira folha, confeccionando o rolo (Gomes-Junior, 2020). O substrato foi previamente umedecido com quantidade de água equivalente a 2,5 vezes a sua massa seca. Os rolos foram mantidos em germinador a 25 ± 1 °C durante três dias. Após este período, as plântulas e as sementes não germinadas de cada repetição foram transferidas para uma folha de E.V.A (etil vinil acetato) de coloração azul com dimensões de 30 x 22 cm (correspondentes ao tamanho da área útil de digitalização do escâner), proporcionado, assim, o contraste necessário para análise pelo sistema (Figura 1). Em seguida, as imagens foram digitalizadas por meio de um escâner HP, modelo Scanjet 200, instalado em posição invertida no interior de uma caixa de alumínio (60,0 x 50,0 x 12,0 cm), ajustando em resolução de 300 dpi e acoplado a um computador (processador Intel Core i7 de 3.50 GHz, 16 GB de memória RAM, HD de 1TB) e monitor de 23 polegadas.

As imagens escaneadas foram processadas pelo *software* Vigor-S, sendo obtidos os índices de vigor (calculado a partir dos índices de crescimento e de uniformidade de desenvolvimento das plântulas) e uniformidade de desenvolvimento, compreendendo valores de 0 a 1000, sendo o vigor das sementes proporcional a estes valores, conforme Rodrigues *et al*, (2020). Além disso, foram registrados resultados médios do comprimento do hipocótilo, da raiz primária e total de plântulas, todos em cm/amostra. Os dados foram exportados para planilhas do Excel. Para o cálculo do índice de vigor foram definidas as configurações de contribuição 70% e 30% dos índices de crescimento e uniformidade,

respectivamente; já a contribuição do valor do hipocótilo e da raiz primária para o cálculo do índice de crescimento foi de 10% e 90%, respectivamente.

3.1.8.2 Uso do Vigor-S para avaliação de plântulas após o teste de envelhecimento acelerado

Amostras de sementes de cada lote e cultivar foram submetidas ao envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl, sob as condições descritas no item 3.1.4. Após o período de envelhecimento, as sementes foram submetidas ao teste de germinação, à aquisição das imagens das plântulas e à análise pelo *software* Vigor-S, conforme o procedimento descrito no item 3.1.8.1.

O ranqueamento dos lotes quanto ao vigor, a partir dos índices de vigor e uniformidade de desenvolvimento e do comprimento do hipocótilo, da raiz primária e total de plântulas obtidos a partir das análises computadorizadas foram comparados com os resultados dos demais testes de vigor convencionalmente utilizados para avaliação de sementes de soja (itens 3.1.3 a 3.1.7).

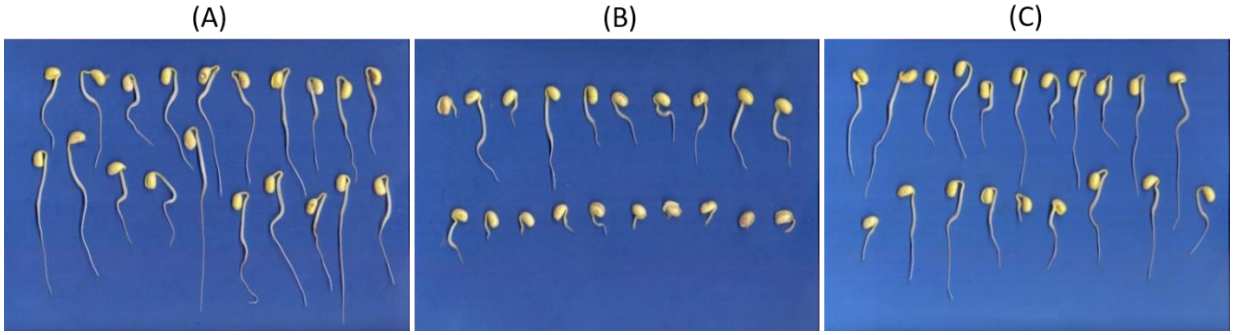


Figura 1. Plântulas de soja de um mesmo lote do cultivar NS 7007, aos três dias de idade, após o teste de germinação tradicional (A), envelhecimento acelerado tradicional (B) e envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl (C).

3.1.9. Avaliação da protrusão da raiz primária (visual e utilizando a análise de imagens)

Utilizando-se caixas plásticas (11 cm x 11 cm x 3,5 cm) com compartimentos individuais (minicâmaras), possuindo no seu interior uma tela metálica, a qual foram distribuídas as sementes de cada lote e cultivar de maneira a formar uma camada única. Foram adicionados 40 ml de água no fundo, e acondicionados em câmara de germinação tipo BOD à temperatura de 20 °C, durante 24 horas. Após o período de exposição, cinco subamostras de 20 sementes foram distribuídas sobre duas folhas de papel-toalha e coberto com uma folha de papel-toalha confeccionando o rolo, umedecido com quantidade de água, equivalente a 2,5 vezes a massa do papel seco. As sementes de soja foram posicionadas de forma que a micrópila estivesse voltada para a parte inferior do papel.

Os rolos com as sementes foram mantidos em germinador do tipo Mangelsdorf MA401, durante diferentes períodos e regulados em diferentes temperaturas, visando identificar o melhor tratamento para

discriminação dos lotes com base na protrusão da raiz primária. Assim, foram avaliados os períodos de 30 e 48 horas a 20 ± 1 °C, 24 e 30 horas a 25 ± 1 °C; 24 e 30 horas a 30 ± 1 °C. Após cada período, o rolo contendo as sementes foi aberto, removida a folha de papel-toalha utilizada para cobrir a sementes e realizada a contagem das plântulas com protrusão da raiz primária de tamanho ≥ 1mm (análise visual) para posterior cálculo da porcentagem de plântulas com a protrusão primária. Em seguida, as imagens das sementes foram capturadas por transiluminação, utilizando equipamento descrito por Gomes-Junior (2020), para posterior avaliação da protrusão da raiz primária utilizando a análise de imagens.

O rolo contendo as sementes, previamente aberto para a análise visual da protrusão da raiz primária foi posicionado diretamente sobre a plataforma de iluminação do equipamento. O mecanismo de iluminação foi ligado e a plataforma fechada. A captura das imagens foi realizada utilizando uma câmera digital (Webcam Logitech C920) instalada no interior do equipamento e conectada a um computador (processador Intel Core i7 de 3.50 GHz, 16GB de memória RAM, HD de 1TB) e monitor de 23 polegadas via *Universal Serial Bus* (USB). As imagens foram salvas no computador para posterior análise utilizando o *software* ImageJ® (Schneider *et al.*, 2012). Na figura 2 estão exemplificadas amostras de sementes capturadas após cada período de germinação, em cada temperatura.

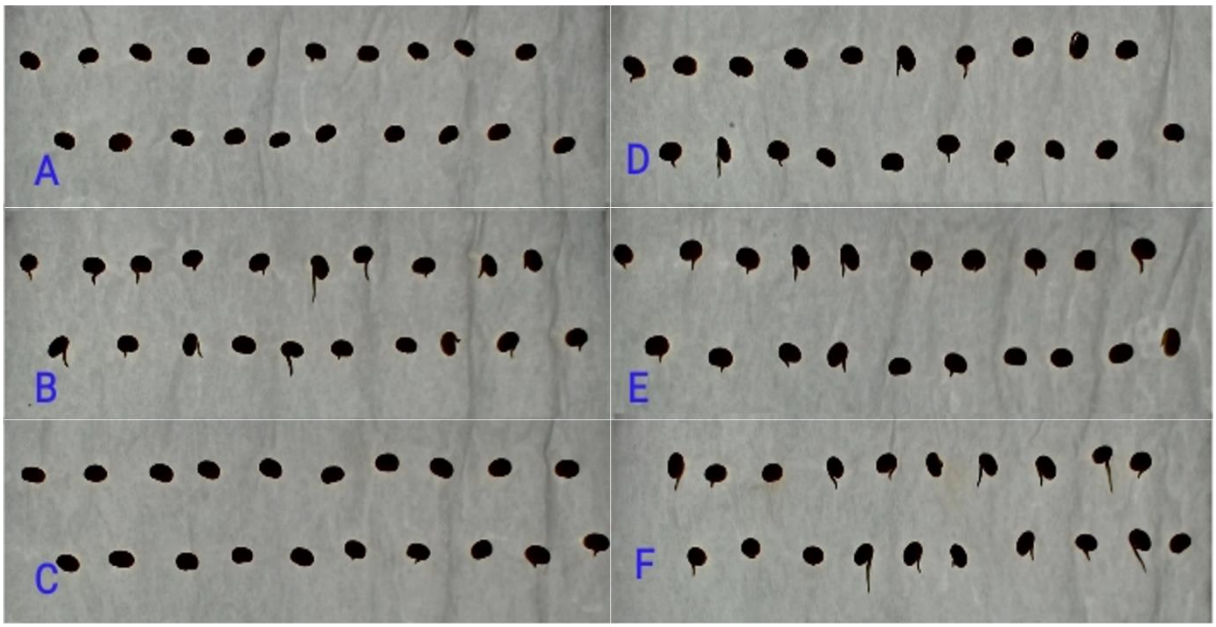


Figura 2. Imagens de sementes de soja representativas dos tratamentos para avaliação dos lotes com base na protrusão da raiz primária. A) 30 horas a 20 ± 1 °C, B) 48 horas a 20 ± 1 °C, C) 24 horas a 25 ± 1 °C, D) 30 horas a 25 ± 1 °C, E) 24 horas a 30 ± 1 °C e F) 30 horas a 30 ± 1 °C.

Na análise pelo *software* ImageJ®, foram avaliados parâmetros morfológicos relacionados à área, perímetro, circularidade, relação de aspecto (*aspect ratio*), redondeza (*roundness*) e solidez (*solidity*) de cada semente (Figura 3), que foram utilizados como indicadores de alterações associadas à protrusão da raiz primária.

a) Perímetro: correspondeu à medida do contorno bidimensional da semente, expresso em milímetros. Aumento expressivo no valor do perímetro foi associado à protrusão da raiz primária;

b) Área: correspondeu à quantidade de espaço bidimensional, ou seja, a superfície da semente, expressa em milímetros quadrados. O aumento expressivo no valor da área foi associado à protrusão da raiz primária;

c) Circularidade: calculada pela fórmula $C = 4\pi \times \frac{[Área]}{[Perímetro]^2}$, correspondeu ao grau de aproximação da imagem bidimensional da semente com o formato circular. Conforme uma forma se torna menos circular e/ou conforme a forma se torna menos lisa, a circularidade deve se aproximar de zero. Valor muito inferior a 1 foi associado à protrusão da raiz primária;

d) Relação de aspecto (*aspect ratio*): calculada pela fórmula $RA = \frac{[Maior\ eixo]}{[Menor\ eixo]}$, representou a razão entre o maior e o menor eixo da elipse que circunscreveu a semente (quanto maior a razão, mais alongada é a semente). Menor valor da razão foi associado à protrusão da raiz primária;

e) Redondeza (*roundness*): calculado pela fórmula $R = 4 \times \frac{[Área]}{\pi \times [Maior\ eixo]^2}$, representou o inverso da relação de aspecto, ou seja, quanto menor a razão, mais circular é a semente. O aumento expressivo no valor foi associado à protrusão da raiz primária;

f) Solidez (*solidity*): calculada pela fórmula $S = \frac{[Área]}{[Área\ convexa]}$, representou a relação entre a área projetada e a área do envoltório convexo. O aumento expressivo desse valor indica quão sólida é a partícula da imagem. A redução expressiva no valor foi associada à protrusão da raiz primária.

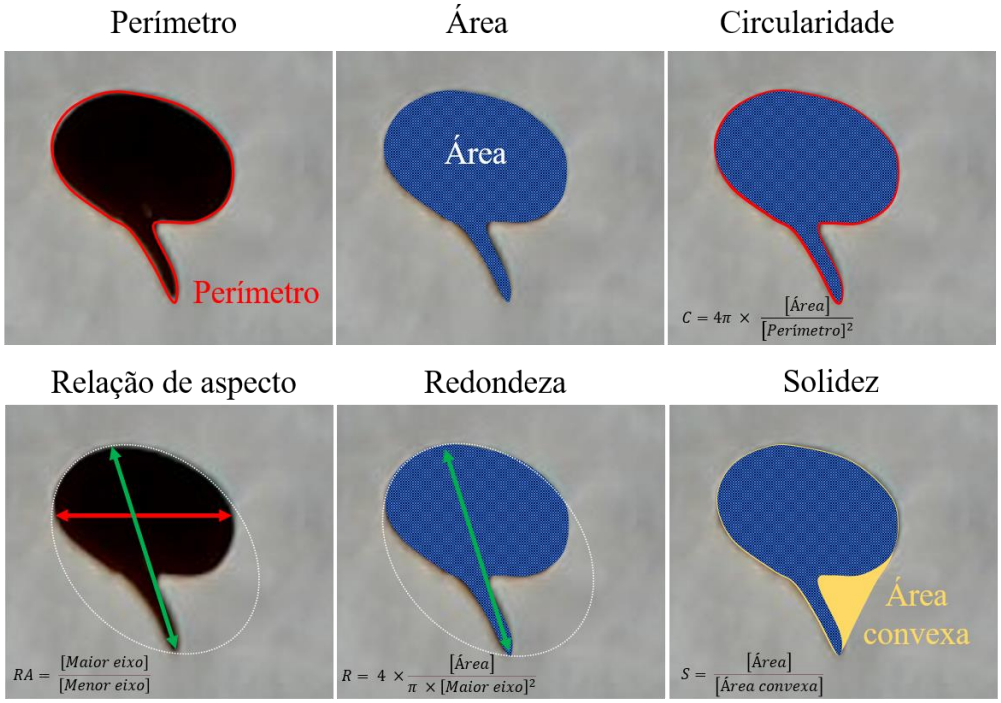


Figura 3. Descritores morfológicos utilizados como indicadores de alterações associadas à protrusão da raiz primária de sementes de soja.

Os resultados de porcentagem de protrusão da raiz primária para cada lote e cultivar, caracterizados pelos atributos morfológicos, foram comparados com os obtidos nos outros testes de vigor conduzidos nesta pesquisa, procurando estabelecer critérios para determinar sua eficiência e potencial para utilização em programas de controle de qualidade de sementes de soja.

3.2. Análise Estatística

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e, quando necessário, os dados expressos em porcentagem foram transformados em arc sen $(x/100)^{1/2}$ e os expressos em índices ou centímetros foram transformados em $(x + 0,5)^{1/2}$. A análise da variância dos dados referentes a cada cultivar e teste foi conduzida de acordo com delineamento inteiramente casualizado, com exceção para os dados de emergência de plântulas em campo, que foram analisados de acordo com delineamento de blocos ao acaso. A análise estatística foi realizada utilizando o programa Sisvar e as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. A análise de componentes principais foi realizada pelo *software* R, versão 4.0.0 (R Core Team, 2019).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Primeira época de avaliação

4.1.1. Avaliação do potencial fisiológico das sementes

Os resultados obtidos da avaliação do potencial fisiológico de sementes de soja do cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e do cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B) encontram-se na Tabela 1. O teor de água inicial das sementes do cultivar A variou de 6,7% a 7,3% e do cultivar B de 7,0% a 7,5%. Após o envelhecimento acelerado tradicional, os valores variaram de 21,9% a 26,6%, para o cultivar A, e de 20,9% a 24,3% para o cultivar B. Já no envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, a variação no teor de água foi de 11,7% a 12,3% para o cultivar A e 11,5% a 12,2% para o cultivar B. O cultivar A apresentou variação de 4,7% no teor de água das sementes após o teste de envelhecimento acelerado tradicional, ou seja, um pouco acima do valor aceitável para assegurar consistência dos resultados. Segundo Marcos-Filho (2020) o teor de água inicial das sementes deve apresentar variações de 2 a 3 pontos percentuais, e amostras submetidas ao envelhecimento acelerado podem variar até 4 pontos percentuais, esses parâmetros auxiliam na confiabilidade para comparação dos resultados de germinação e vigor.

Os maiores valores de teor de água das sementes após o teste de envelhecimento acelerado tradicional devem-se ao fato de as sementes serem expostas à umidade relativa de, aproximadamente, 100%, enquanto no teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl a umidade relativa varia entre 55% a 76% (Marcos-Filho *et al.*, 2000). Assim, para ambos os cultivares a utilização do teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, proporcionou menor taxa de absorção de água pelas sementes e menor variabilidade dos resultados de teor de água entre os lotes, aumentando a consistência dos resultados.

A análise estatística revelou diferenças significativas ($p \leq 0,05$) na germinação e primeira contagem de germinação entre os lotes de sementes apenas para o cultivar A. Os lotes A4, A7, A8 e A9 apresentaram menores porcentagens de germinação em comparação com os lotes A1, A2, A3, A5 e A6. Já para a porcentagem de plântulas normais na primeira contagem de germinação, os lotes A1 e A2 apresentaram maiores porcentagens e os lotes A8 e A9 menores porcentagens. Considerando os dois cultivares, todos os lotes apresentaram germinação dentro dos padrões para a comercialização (superior a 80%) conforme Brasil (2013). A menor germinação foi observada para o lote A8 com 84% de plântulas normais.

No teste de envelhecimento acelerado tradicional do cultivar A verificou-se maiores valores para os lotes A1, A2 e A3 e menores valores para os lotes A7, A8 e A9. Já no teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl os lotes A2 e A3 apresentaram valores superiores quando comparados com os demais lotes.

Tabela 1. Teores de água inicial, após o envelhecimento acelerado tradicional (T.A. EAT 48h) e após o envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl (T.A. EASS 72h), germinação (G), primeira contagem de germinação (PCG), envelhecimento acelerado tradicional (EAT 48h) e com solução saturada de NaCl (EASS 72h), condutividade elétrica, vigor (VIG) e viabilidade (VIAB) avaliados pelo teste de tetrazólio, emergência de plântulas em campo (EPC) e índice de velocidade de emergência (IVE), em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na primeira época de avaliação.

Lotes	TA	TA. EAT	TA. EASS	G[1]	PCG[1]	EAT[1]	EASS[1]	CE[2]	VIG[1]	VIAB[1]	EPC[1]	IVE[2]
	---------- % ----------							$\mu S.cm^{-1}.g^{-1}$	---------- % ----------			índice
						Cultivar A						
A1	6,7	22,9	12,0	98 A	98 A	85 A	93 B	69,34 A	94 A	98 A	81 A	8,72 A
A2	6,9	21,9	11,9	99 A	99 A	85 A	97 A	65,75 A	90 B	95 A	87 A	9,19 A
A3	7,2	24,4	12,3	97 A	95 B	88 A	98 A	63,62 A	93 A	95 A	88 A	9,04 A
A4	6,9	23,3	12,1	93 B	89 C	34 B	89 C	101,22 B	82 C	90 B	74 B	6,74 B
A5	6,8	22,5	12,1	95 A	87 C	22 C	87 C	107,97 B	85 C	93 B	62 B	5,37 B
A6	6,8	24,1	11,9	94 A	91 B	20 C	90 C	114,88 B	84 C	92 B	68 B	5,96 B
A7	7,0	26,6	11,9	92 B	84 C	12 D	89 C	113,93 B	83 C	93 B	63 B	5,49 B
A8	7,3	22,6	11,7	84 B	65 E	16 D	80 C	123,55 B	82 C	92 B	69 B	5,98 B
A9	6,9	22,0	11,8	89 B	76 D	12 D	86 C	120,47 B	82 C	91 B	67 B	5,90 B
Média	-	-	-	93,1	86,7	41,5	89,7	97,85	85,9	93,0	73,00	6,93
CV (%)	-	-	-	4,75	6,25	12,62	4,86	9,91	2,81	2,48	13,42	13,19
						Cultivar B						
B1	7,1	23,1	11,7	98 A	98 A	98 A	98 A	77,54 B	94 B	96 B	92 A	9,90 A
B2	7,3	22,3	11,8	99 A	99 A	98 A	97 A	70,27 A	97 A	98 A	92 A	9,58 B
B3	7,1	23,5	12,2	98 A	97 A	94 A	98 A	79,40 B	95 A	99 A	91 A	9,56 B
B4	7,0	23,6	11,5	98 A	98 A	94 A	97 A	80,65 B	96 A	98 A	95 A	10,71 A
B5	7,3	24,3	12,0	99 A	99 A	93 A	99 A	85,52 C	92 C	96 B	92 A	9,90 A
B6	7,2	23,9	11,9	99 A	99 A	94 A	97 A	72,85 A	98 A	99 A	94 A	10,41 A
B7	7,2	23,0	11,7	99 A	99 A	94 A	98 A	76,59 B	96 A	97 B	94 A	9,94 A
B8	7,1	23,5	11,8	98 A	98 A	93 A	97 A	79,63 B	94 B	97 B	94 A	9,42 B
B9	7,5	20,9	11,9	99 A	99 A	76 B	97 A	91,83 C	92 C	97 B	90 A	8,88 B
B10	7,3	24,0	11,8	97 A	97 A	95 A	98 A	74,46 A	94 B	97 B	89 A	9,56 B
Média	-	-	-	98,1	97,9	92,7	97,5	78,87	94,5	97,1	92	9,78
CV (%)	-	-	-	1,95	1,98	5,23	2,13	5,55	1,52	1,39	4,45	5,18

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [1]Dados transformados em arc sen $(x/100)^{1/2}$, [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Os lotes do cultivar B apresentaram potencial fisiológico mais elevado e mais uniforme em relação ao cultivar A. Diferenças entre os lotes foram observadas nos testes de envelhecimento acelerado tradicional, condutividade elétrica, vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio e índice de velocidade de emergência de plântulas. No teste de envelhecimento acelerado tradicional, o lote B9 foi classificado como o de pior desempenho em relação aos demais lotes. O teste de envelhecimento

acelerado é um teste de estresse, o qual expõe as sementes a alta temperatura e umidade; assim, sementes de alto potencial fisiológico são mais tolerantes às condições de estresse.

Os baixos percentuais de plântulas normais no teste de envelhecimento acelerado tradicional, principalmente para o cultivar A, mostram que a utilização do envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl pode ser uma importante estratégia para regular a absorção de águas pelas sementes e possibilitar a classificação segura dos lotes de sementes. Sementes com teores de água mais altos tanto no início quanto durante o período de envelhecimento são mais sensíveis às condições do teste de envelhecimento acelerado. O envelhecimento acelerado com solução salina, é conduzido sob umidade relativa menor, tornando o teste de envelhecimento acelerado menos severo, mas não reduz sua eficiência em relação ao procedimento tradicional (Marcos-Filho *et al.*, 2000).

Em relação ao teste de condutividade elétrica, os lotes A1, A2 e A3 apresentaram desempenho superior em relação aos demais lotes do cultivar A. Para o cultivar B, os lotes B2 e B6 apresentaram desempenho superior em relação aos lotes B5 e B9. Os menores valores de condutividade elétrica dos lotes A1, A2, A3, B2 e B6 devem-se à baixa lixiviação de exsudatos liberados durante a embebição, indicando melhor organização dos sistemas de membranas e maior vigor das sementes. Rodrigues *et al*. (2006), relataram que a redução da lixiviação de íons e outros componentes presentes, contribui para diminuir a condutividade na água de imersão.

Nos cultivares A e B foram observadas diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre os lotes para vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio. Com relação aos resultados do cultivar A, os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 apresentaram menores porcentagens de vigor e viabilidade em relação aos demais lotes. Para o cultivar B, os lotes B2, B3, B4, B6 e B7 evidenciaram desempenho superior em relação aos lotes B5 e B9 no teste de vigor avaliado pelo teste de tetrazólio. No teste de viabilidade avaliado pelo teste de tetrazólio, os lotes B2, B3, B4 e B6 apresentaram desempenho superior em relação ao restante dos lotes do cultivar B.

Quanto à porcentagem de emergência de plântulas em campo e ao índice de velocidade de emergência, ocorreram diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre os lotes do cultivar A. Os lotes A1, A2 e A3 apresentaram desempenho superior aos demais lotes. No cultivar B, diferenças significativas ocorreram apenas para o índice de velocidade de emergência, os lotes B1, B3, B4, B5, B6 e B7 apresentando maiores valores em relação aos demais lotes. Ao comparar os resultados de emergência de plântulas em campo com os de germinação, observa-se menor porcentagem de emergência de plântulas. Segundo Marcos Filho (2015), essa redução da porcentagem e velocidade de emergência de plântulas é consequência das condições menos favoráveis do ambiente e suas relações com o desempenho de sementes menos vigorosas.

Ressalta-se que os testes de envelhecimento acelerado tradicional, condutividade elétrica, viabilidade avaliada pelo teste de tetrazólio, emergência de plântulas em campo e índice de velocidade de emergência identificaram apenas os lotes mais vigorosos do cultivar A. Em relação ao cultivar B, os lotes apresentaram potencial fisiológico mais próximo, porém, nos testes de envelhecimento acelerado

tradicional, condutividade elétrica, vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio e índice de velocidade de emergência foi possível classificar os lotes de maior e menor desempenho.

As variáveis climáticas apresentadas na Figura 4 mostram baixa precipitação pluvial durante o período de condução do teste (média de 10,62 mm). Entretanto, essa condição não foi responsável para que ocorressem menor porcentagem de emergência e índice de velocidade de emergência de plântulas, pois a cultura foi irrigada por aspersão, conforme a necessidade. A temperatura ótima para o desenvolvimento da soja é 32 °C, sendo a temperatura mínima de 8 °C e máxima de 40 °C (Castro *et al*., 1983). E as temperaturas médias inferiores a 20 °C podem ser responsáveis pelo atraso na emergência e no desenvolvimento vegetativo da cultura da soja (Mondini; Vieira; Cambraia, 2001). Porém, durante o período mais crítico que é a embebição (primeiras 48 horas), a temperatura média ficou próxima de 25 °C, não interferindo na porcentagem de emergência e índice de velocidade de emergência das plântulas em campo para ambos os cultivares.

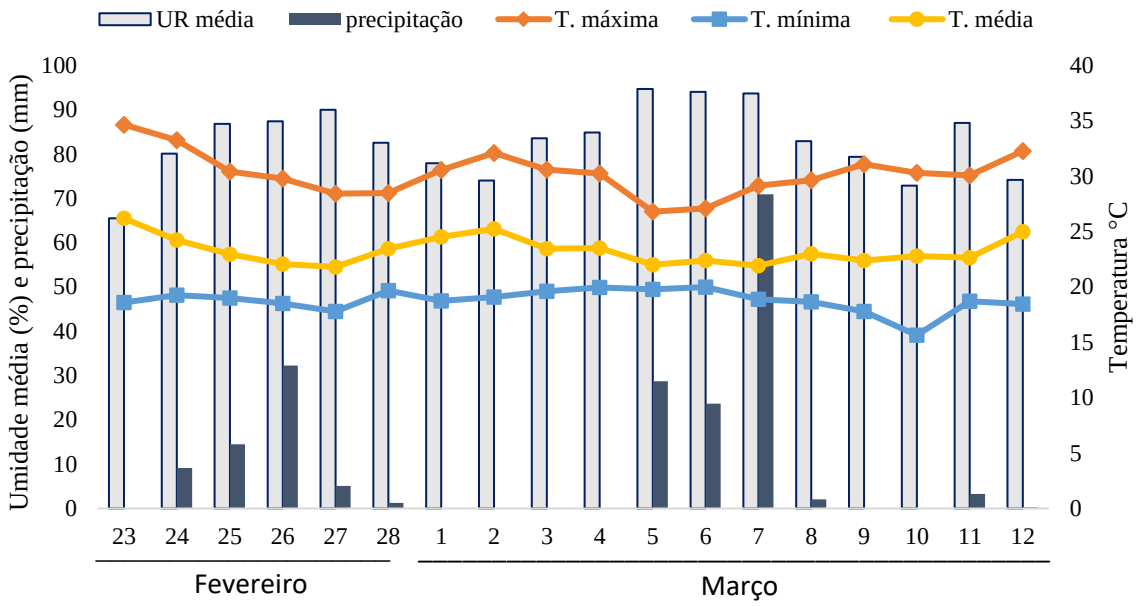


Figura 4. Variáveis climáticas: temperaturas máximas, médias e mínimas, umidade relativa do ar (UR) e precipitação pluvial durante a condução do teste de emergência de plântulas em campo na primeira época de avaliação. Fonte – Base de dados da estação meteorológica automática área de agrometeorologia - LEB - ESALQ - USP - Piracicaba, SP, 2021.

Os resultados da análise computadorizada de imagens de plântulas (Vigor-S) estão apresentados na Tabela 2. Observa-se para o cultivar A, os lotes A1, A2 e A3 apresentaram maiores índices de vigor, maior comprimento médio de plântulas, comprimento de hipocótilo e comprimento de raiz em comparação aos demais lotes. Pela análise Vigor-S houve a estratificação dos lotes de maneira semelhante aos outros testes de vigor (Tabela 1). Os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 que apresentaram desempenhos inferiores nas avaliações de condutividade elétrica, viabilidade pelo teste de tetrazólio,

emergência de plântulas em campo e índice de velocidade de emergência também exibiram menores resultados na análise Vigor-S.

Quanto às análises Vigor-S dos lotes do cultivar B, os resultados mostraram melhor desempenho do lote B6 e pior desempenho do lote B9 para o índice de vigor e comprimento de raiz. Para o comprimento médio de plântulas o lote B6 foi o que apresentou maior valor e os lotes B2, B3 e B9 apresentaram menores valores. Já para o comprimento de hipocótilo, os lotes B2 e B9 apresentam valores inferiores em relação aos demais lotes.

Os resultados das análises Vigor-S referentes ao cultivar B apresentaram discriminação semelhante aos resultados obtidos nos testes de vigor descritos anteriormente (Tabela 1), ou seja, evidenciaram melhor desempenho do lote B6 e o lote B9 com desempenho inferior nas avaliações das análises Vigor-S, envelhecimento acelerado tradicional, condutividade elétrica, vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio e o índice de velocidade de emergência. Em relação ao índice de uniformidade de desenvolvimento, os lotes mais vigorosos apresentaram maiores índices de uniformidade para ambos os cultivares.

Tabela 2. Índices de vigor (IV) e de uniformidade de desenvolvimento (IU), comprimento médio de plântulas (CP), comprimento de hipocótilo (CH) e comprimento de raiz (CR) obtidos em análises Vigor-S, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na primeira época de avaliação.

Lotes	(IV)[2]	(IU)[2]	(CP)[2]	(CH)[2]	(CR)[2]
	----- índice -----		---------- cm ----------		
			Cultivar A		
A1	739 A	760 A	9,50 A	2,94 A	6,50 A
A2	740 A	741 A	9,60 A	2,88 A	6,66 A
A3	772 A	781 A	10,22 A	3,32 A	6,82 A
A4	323 B	561 B	3,62 B	1,70 B	1,84 B
A5	294 B	590 B	2,90 C	1,48 B	1,38 B
A6	357 B	606 B	4,04 B	1,88 B	2,14 B
A7	325 B	577 B	3,54 B	1,68 B	1,84 B
A8	322 B	525 B	3,76 B	1,74 B	2,00 B
A9	354 B	594 B	4,16 B	2,02 B	2,14 B
Média	470	637	5,70	2,18	3,48
CV (%)	10,82	10,11	11,73	14,11	15,18
			Cultivar B		
B1	828 B	821 A	10,08 B	2,56 A	7,52 B
B2	737 C	808 A	8,54 C	2,14 B	6,42 C
B3	717 C	708 B	8,90 C	2,38 A	6,50 C
B4	818 B	764 A	10,18 B	2,52 A	7,64 B
B5	777 C	781 A	9,68 B	2,68 A	6,98 C
B6	918 A	836 A	11,82 A	2,86 A	8,96 A
B7	798 B	740 B	9,94 B	2,46 A	7,46 B
B8	742 C	700 B	9,44 B	2,56 A	6,86 C
B9	668 D	716 B	7,86 C	1,98 B	5,84 D
B10	857 B	793 A	10,58 B	2,54 A	7,96 B
Média	786	766	9,70	2,46	7,21
CV (%)	6,51	7,18	8,22	13,41	7,76

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Considerando conjuntamente os resultados dos testes de avaliação de potencial fisiológico dos lotes dos dois cultivares (Tabelas 1 e 2), os lotes A1, A2 e A3 do cultivar A apresentaram potencial fisiológico superior em relação aos demais lotes, identificados nos testes de envelhecimento acelerado tradicional, condutividade elétrica, viabilidade avaliado pelo teste de tetrazólio, emergência de plântulas em campo, índice de velocidade de emergência, e em todos os parâmetros avaliados na análise Vigor-S tradicional.

Para o cultivar B, o melhor e pior desempenho foi observado para os lotes B6 e B9, respectivamente. Essa identificação dos lotes foi observada nos testes de envelhecimento acelerado tradicional, condutividade elétrica, vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio e índice de velocidade de emergência e em todos os parâmetros avaliados na análise Vigor-S tradicional.

Um dos propósitos desta pesquisa consistiu na avaliação da eficiência da análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado, comparativamente a outros testes tradicionalmente utilizados para avaliação do vigor de sementes de soja (Tabelas 1 e 2). Nas Tabelas 3 e 4 estão apresentados os resultados da análise computadorizada de imagens de plântulas pelo sistema Vigor-S após o teste de envelhecimento tradicional e envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, para os dois cultivares.

Tabela 3. Índices de vigor (IV) e de uniformidade de desenvolvimento (IU), comprimento médio de plântulas (CP), comprimento de hipocótilo (CH) e comprimento de raiz (CR) obtidos em análises Vigor-S após o teste de envelhecimento tradicional e envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A), na primeira época de avaliação.

EAT (41°C/48h)						
Lotes	**(IV)[2]**	**(IU)[2]**	**(CP)[2]**	**(CH)[2]**	**(CR)[2]**	**TA.EAT**
	----- índice -----		**---------- cm ----------**			**%**
A1	391 A	540 A	4,95 B	2,11 B	2,83 B	25,9
A2	444 A	597 A	5,82 A	2,53 A	3,28 A	25,4
A3	351 A	464 A	4,60 B	1,98 B	2,63 B	26,3
A4	101 B	276 B	0,48 C	0,28 C	0,22 C	27,6
A5	80 B	210 B	0,52 C	0,29 C	0,20 C	26,0
A6	116 B	330 B	0,54 C	0,34 C	0,19 C	27,5
A7	53 B	147 B	0,26 C	0,19 C	0,17 C	27,2
A8	93 B	259 B	0,50 C	0,35 C	0,09 C	26,2
A9	76 B	218 B	0,38 C	0,23 C	0,11 C	27,0
Média	190	338	2,00	0,92	1,08	-
CV (%)	29,84	40,37	27,37	26,56	31,76	-
EASS (41°C/72h)						
Lotes	**(IV)[2]**	**(IU)[2]**	**(CP)[2]**	**(CH)[2]**	**(CR)[2]**	**T.A. EASS**
	----- índice -----		**---------- cm ----------**			**%**
A1	661 A	739 A	8,34 A	2,71 A	5,59 A	12,8
A2	661 A	738 A	8,26 A	2,62 A	5,60 A	12,5
A3	676 A	726 A	8,58 A	2,74 A	5,84 A	12,3
A4	308 B	623 B	3,20 B	1,74 B	1,43 B	12,6
A5	265 C	584 B	2,38 C	1,33 C	1,05 C	12,4
A6	306 B	605 B	3,10 B	1,60 B	1,53 B	12,5
A7	260 C	567 B	2,48 C	1,44 C	1,07 C	12,7
A8	244 C	490 B	2,46 C	1,29 C	1,16 C	12,6
A9	265 C	564 B	2,52 C	1,39 C	1,14 C	12,4
Média	405	626	4,59	1,87	2,71	-
CV (%)	10,43	10,50	13,27	11,75	17,24	-

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Os resultados obtidos após o teste de envelhecimento acelerado tradicional do cultivar A evidenciaram superioridade dos lotes A1, A2 e A3 em relação aos demais lotes para os parâmetros de

índice de vigor. Para o comprimento médio de plântulas, comprimento de hipocótilo e comprimento de raiz, o lote A2 apresentou melhor desempenho e os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 apresentarem piores desempenhos.

Quanto às análises Vigor-S após o envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl também foi observada superioridade dos lotes A1, A2 e A3 em relação aos demais lotes para todos os parâmetros avaliados. Para o índice de vigor, comprimento médio de plântulas, comprimento de hipocótilo e comprimento de raiz, os lotes A5, A7, A8 e A9 apresentaram piores desempenhos. Todos os parâmetros obtidos apresentaram informações semelhantes quanto à indicação dos melhores lotes e essa separação foi observada nos testes tradicionais de vigor, análise Vigor-S tradicional e no índice de vigor da análise Vigor-S após o envelhecimento acelerado tradicional e análise Vigor-S após envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl.

Tabela 4. Índices de vigor (IV) e de uniformidade de desenvolvimento (IU), comprimento médio de plântulas (CP), comprimento de hipocótilo (CH) e comprimento de raiz (CR) obtidos em análises Vigor-S após o teste de envelhecimento tradicional e envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na primeira época de avaliação.

			EAT (41°C/48h)			
Lotes	**(IV)[2]**	**(IU)[2]**	**(CP)[2]**	**(CH)[2]**	**(CR)[2]**	**T.A.EAT**
	----- índice -----		**---------- cm ----------**			**%**
B1	675 B	757 A	8,04 B	2,29 C	5,77 B	24,2
B2	544 C	702 A	6,56 C	2,33 C	4,22 C	24,6
B3	526 C	736 A	6,08 C	2,23 C	3,85 C	24,9
B4	753 A	777 A	9,36 A	2,69 A	6,68 A	26,2
B5	489 C	706 A	5,52 C	2,03 C	3,49 C	26,5
B6	722 A	756 A	9,22 A	2,85 A	6,32 A	26,9
B7	722 A	773 A	8,76 A	2,47 B	6,31 A	24,6
B8	657 B	725 A	8,10 B	2,47 B	5,63 B	26,0
B9	467 C	609 B	5,56 C	1,99 C	3,60 C	26,2
B10	773 A	799 A	9,64 A	2,78 A	6,86 A	25,2
Média	632	733	7,68	2,41	5,27	-
CV (%)	9,68	9,29	9,60	10,35	11,32	-
			EASS (41°C/72h)			
Lotes	**(IV)[2]**	**(IU)[2]**	**(CP)[2]**	**(CH)[2]**	**(CR)[2]**	**T.A. EASS**
	----- índice -----		**---------- cm ----------**			**%**
B1	871 A	825 A	10,84 A	2,77 A	8,08 B	12,4
B2	788 B	763 A	9,84 B	2,62 A	7,23 C	12,1
B3	754 B	728 A	9,72 B	2,81 A	6,89 C	12,5
B4	867 A	774 A	11,10 A	2,82 A	8,30 B	12,4
B5	761 B	758 A	9,48 B	2,62 A	6,88 C	12,3
B6	916 A	778 A	11,90 A	2,68 A	9,20 A	12,4
B7	867 A	780 A	11,02 A	2,82 A	8,18 B	11,9
B8	871 A	851 A	10,76 A	2,55 A	8,18 B	12,5
B9	778 B	803 A	9,32 B	2,38 A	6,95 C	12,3
B10	887 A	791 A	11,00 A	2,55 A	8,44 B	12,1
Média	836	785	7,26	2,66	7,83	-
CV (%)	6,62	7,54	10,49	9,97	7,94	-

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Quanto às análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional dos lotes do cultivar B (Tabela 4), os resultados das avaliações de índice de vigor, comprimento médio de plântulas e comprimento de raiz mostraram melhores desempenhos dos lotes B4, B6, B7 e B10 e piores desempenhos dos lotes B2, B3, B5 e B9. Para o comprimento de hipocótilo, os lotes de melhores desempenhos foram B4, B6 e B10 e os lotes inferiores foram B1, B2, B3, B5 e B9.

Com relação às avaliações de índice de vigor e comprimento médio de plântulas após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl verificou-se piores desempenhos para os lotes B2, B3, B5 e B9 em relação aos demais lotes. Quanto ao comprimento de raiz o lote de melhor desempenho foi o B6 e os lotes de piores desempenhos foram B2, B3, B5 e B9. Para o índice de uniformidade e comprimento de hipocótilo não ocorreram diferenças significativas entre os lotes. Foi possível identificar semelhança na classificação do lote B6 que apresentou maior vigor e o lote B9 que apresentou menor vigor nos testes de vigor tradicionais, análise Vigor-S tradicional e análises Vigor-S após envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl.

As Tabelas 3 e 4 também apresentam o teor de água das sementes utilizadas na análise Vigor-S após o envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl. Para o cultivar A, a variação foi de 25,4% a 27,6% e 12,3% a 12,8%, respectivamente. Em relação ao cultivar B, a variação do teor de água após o teste de envelhecimento acelerado tradicional foi de 24,2% a 26,5% e após o envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl de 11,9% a 12,5%. Dessa forma, a variação do teor de água das sementes utilizadas nas análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl apresentou variações inferiores a 4 pontos percentuais, sendo adequada para confiabilidade na comparação dos resultados.

Foram observadas semelhanças na separação dos lotes do cultivar A na análise Vigor-S sem o envelhecimento das sementes (Tabela 2) e nas análises Vigor-S após o envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl (Tabelas 3 e 4). Pelos índices de vigor, comprimento médio de plântulas, comprimento de hipocótilo e comprimento de raiz, os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 apresentaram desempenho inferior em relação aos lotes A1, A2 e A3 tanto na análise Vigor-S quanto nas análises Vigor-S após envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl. Em relação aos testes de vigor tradicionalmente utilizados (Tabela 1), os mesmos lotes identificados como menos vigorosos pela análise Vigor-S apresentaram menores valores significativos para os testes de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, condutividade elétrica, vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio, emergência de plântulas em campo e índice de velocidade de emergência (Tabelas 1, 2 e 3).

Quanto aos resultados do cultivar B, os lotes B6 e B9 apresentaram melhor e pior desempenho, respectivamente. Essa identificação também foi observada nos testes de envelhecimento acelerado tradicional, condutividade elétrica, vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio, índice de velocidade de emergência, todos os parâmetros avaliados pelo Vigor-S, Vigor-S após o envelhecimento acelerado tradicional, e Vigor-S após envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl com exceção do comprimento de hipocótilo (Tabelas 1, 2 e 4). Segundo Marcos-Filho (2015), as manifestações do baixo potencial fisiológico podem ser atribuídas à menor velocidade de germinação, maior sensibilidade das sementes e plântulas a estresses durante esse processo e plantas com crescimento vagaroso, reduzido, desuniforme e com menor desenvolvimento radicular.

Conforme apresentado na Tabela 1, as porcentagens de plântulas normais após o teste de envelhecimento tradicional foram relativamente menores quando comparadas com os valores obtidos no envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl para ambos os cultivares. Esses efeitos mais drásticos do teste de envelhecimento acelerado tradicional também se manifestaram na redução do desenvolvimento das plântulas evidenciado pelos parâmetros fornecidos pela análise computadorizada, conforme observado na Figura 1. No entanto, para o cultivar B, o teste de envelhecimento acelerado tradicional, apresentou maior sensibilidade para ranquear lotes com semelhanças no potencial fisiológico. Entretanto, para ambos os cultivares o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl apresentou maior controle do teor de água das sementes, corroborando para a confiabilidade dos resultados.

Os resultados das análises Vigor-S após o envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl mostraram que é possível a complementação e interpretação do teste, utilizando os índices de vigor, comprimento médio de plântulas, comprimento de raiz e comprimento de hipocótilo. O sistema Vigor-S como complemento das informações obtidas no teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, também foi estudado em sementes de melão e os resultados possibilitaram a avaliação mais precisa em relação à contagem de plântulas normais obtidas no teste de envelhecimento acelerado, além da redução de um dia no período necessário para avaliação (Leite, 2020).

Comparando os resultados dos índices de vigor das análises Vigor-S, Vigor-S após o envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl é possível observar que os lotes A1, A2 e A3; B2 e B9 apresentaram o mesmo desempenho quando comparados com os testes de vigor tradicionais (Tabela 1).

Com relação ao índice de uniformidade de desenvolvimento dos lotes de ambos os cultivares nas análises Vigor-S sem o envelhecimento das sementes, após o envelhecimento tradicional e com solução saturada de NaCl, e verificou-se que os lotes mais vigorosos apresentaram maiores índices de uniformidade em relação aos lotes de menor vigor. Castan (2018) relatou que o sistema de análise de imagem de plântulas (Vigor-S) apresenta informações semelhantes com os testes tradicionais de vigor, evidenciou resultados promissores do índice de uniformidade.

Para o comprimento médio de plântulas obtido pela análise Vigor-S tradicional e Vigor-S após envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl foi observada a mesma discriminação dos lotes dos cultivares A e B em comparação aos testes tradicionais, entretanto, nas análises Vigor-S após o envelhecimento acelerado tradicional apresentou maior sensibilidade para diferenciação dos lotes de ambos os cultivares. Segundo Marcos-Filho (2015), o envelhecimento das sementes afeta primeiramente a velocidade de germinação e de crescimento das plântulas e depois afeta a capacidade germinativa das sementes.

Além da análise Vigor-S proporcionar rapidez e objetividade nas avaliações, há a possibilidade do armazenamento de um banco de imagens para posterior análises ou conferências. Ainda permite

outros benefícios, como a complementação de informações fornecidas por outros testes de vigor sobre o desempenho das plântulas em menor tempo de avaliação, como o teste de envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl. Rodrigues *et al.* (2020) relataram a importância do Vigor-S como ferramenta complementar para interpretação de outros testes como envelhecimento acelerado, tetrazólio, entre outros.

4.1.2. Avaliação da protrusão da raiz primária

Os resultados das avaliações visuais da protrusão da raiz primária (≥ 1 mm) estão apresentados na Tabela 5. Nas condições de germinação a 25 °C / 24h, 25 °C / 30h e 30 °C / 30h não foram observadas diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre os lotes do cultivar A. Contudo, a 20 °C / 30h foi verificada maior porcentagem de protrusão da raiz primária do lote A1 em relação aos demais lotes, com o lote A2 apresentando posição intermediária. Nas condições de germinação a 20 °C / 48h os lotes A1, A2, A3, A4 e A7 apresentaram maiores porcentagens em relação aos demais lotes; a 30 °C / 24h os lotes A1, A2 e A3 foram superiores aos demais lotes.

O tratamento 30 °C / 24h identificou os lotes de maneira semelhante aos testes de vigor tradicionais (Tabela 1) evidenciado pelos testes de envelhecimento acelerado tradicional, condutividade elétrica, emergência de plântulas em campo e índice de velocidade de emergência, em todos os parâmetros avaliados na análise Vigor-S tradicional (Tabela 2), análise Vigor-S após envelhecimento acelerado tradicional para o índice de vigor, e análise Vigor-S após envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl para todos os parâmetros avaliados (Tabela 3).

Para o cultivar B, observou-se que a 20 °C / 30h os lotes B1, B4, B5, B6 e B10 apresentaram maiores porcentagens de protrusão da raiz primária em relação aos demais lotes. Já a 25 °C / 24h os lotes B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9 e B10 apresentaram desempenho superior em relação aos lotes B1 e B2. Nas condições experimentais de 30 °C / 24h observou-se desempenho superior dos lotes B2, B4, B5, B6, B8 e B10 em relação aos demais lotes, enquanto que a 20 °C / 48h, 25 °C / 30h e 30 °C / 30h não foram observadas diferenças significativas entre os lotes.

Nos tratamentos 20 °C / 30h e 30 °C / 24h houve separação dos lotes de maneira semelhante às avaliações de potencial fisiológico apresentadas na Tabela 1 e 2, sendo os testes de envelhecimento acelerado tradicional, condutividade elétrica, vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio, índice de velocidade de emergência, todos os parâmetros analisados no Vigor-S tradicional e Vigor-S após envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl (Tabela 4).

Tabela 5. Porcentagem de plântulas com protrusão da raiz primária (P.R.P.) obtidas na avaliação visual após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na primeira época de avaliação.

	% P.R.P. [1]					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	23 A	96 A	25 A	66 A	81 A	93 A
A2	14 B	93 A	31 A	83 A	81 A	88 A
A3	8 C	90 A	30 A	71 A	79 A	88 A
A4	0 C	87 A	35 A	71 A	62 B	86 A
A5	1 C	75 B	17 A	54 A	57 B	81 A
A6	1 C	76 B	27 A	85 A	64 B	93 A
A7	1 C	83 A	18 A	60 A	59 B	85 A
A8	4 C	70 B	32 A	66 A	56 B	86 A
A9	3 C	68 B	32 A	78 A	58 B	91 A
Média	6,1	82,0	27,4	70,4	66,3	87,9
CV (%)	81,4	10,4	47,9	15,4	20,7	8,1
			Cultivar B			
B1	59 A	97 A	64 B	95 A	86 B	99 A
B2	50 B	99 A	75 B	92 A	90 A	97 A
B3	34 B	93 A	80 A	94 A	87 B	96 A
B4	74 A	95 A	94 A	98 A	96 A	99 A
B5	59 A	94 A	91 A	98 A	95 A	98 A
B6	73 A	100 A	84 A	94 A	93 A	100 A
B7	55 B	95 A	83 A	94 A	75 B	96 A
B8	53 B	96 A	92 A	97 A	92 A	97 A
B9	43 B	92 A	84 A	95 A	85 B	94 A
B10	64 A	98 A	80 A	91 A	94 A	97 A
Média	56,4	95,9	82,9	94,8	89,3	97,4
CV (%)	23,2	5,0	12,8	4,7	9,5	3,9

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [1] Dados transformados em arc sen $(x/100)^{1/2}$.

As maiores porcentagens de plântulas com protrusão da raiz primária das sementes do cultivar A ocorreram nos tratamentos 20 °C / 48h e 30 °C / 30h e, para o cultivar B, nos tratamentos 20 °C / 48h, 25 °C / 30h e 30 °C / 30h. O processo de germinação é influenciado por diversos fatores bióticos e abióticos como genótipo, respostas hormonais e fatores relacionados ao ambiente como umidade, temperatura e oxigênio (Bassel, 2016).

Para os dois cultivares, a avaliação visual da protrusão da raiz primária revelou maiores porcentagens no tratamento 30 °C / 30h, porém sem apresentar sensibilidade para a discriminação dos lotes quanto ao vigor. A velocidade de embebição das sementes é afetada pelo teor de água, temperatura, taxa de absorção e características da semente relacionadas ao potencial fisiológico (Vertucci, 1989). De

acordo com Silva e Nascimento (2010), a temperatura pode alterar o processo de absorção de água, influenciando, em alguns casos, aspectos fisiológicos como conformação de membranas. Assim, a temperatura de 30 °C proporcionou aceleração do metabolismo e, quando foi realizada a avaliação da protrusão da raiz primária após 30h, todas as sementes dos lotes já haviam emitido a raiz primária de forma semelhante, visto que o critério utilizado foi tamanho da raiz primária de pelo menos 1 mm. Segundo Azeredo *et al.* (2011), a temperatura influencia a velocidade e a porcentagem final de germinação, tanto com relação à absorção de água pela semente quanto às reações bioquímicas que regulam o metabolismo envolvido nesse processo.

Segundo Barros e Peske (2006), a primeira fase do processo de embebição é representada pela absorção de água; a segunda fase apresenta ativação das atividades metabólicas e mobilização das reservas que serão utilizadas na germinação. Na fase terceira fase da germinação, após a semente absorver água, ocorre o processo de difusão, com o amolecimento do tegumento e expansão do embrião e dos tecidos de reserva; assim, o aumento de volume nas células facilita a ruptura do tegumento e ocorre a protrusão da raiz primária. Segundo Taiz e Zeiger (2017), as funções metabólicas das sementes iniciam durante a embebição e, ao mesmo tempo, ocorre o aumento do volume até o rompimento do tegumento. Essas alterações morfológicas associadas à protrusão da raiz primária dificilmente podem ser quantificadas a partir da análise visual. Porém, com o auxílio de recursos computacionais isso torna-se possível. Dell'Aquila (2009) relatou que a análise de imagem é uma técnica promissora para detectar essas diferenças nos parâmetros morfológicos, caracterizando protrusão da raiz primária das sementes, e assim, relacionar com o vigor.

Com relação às alterações nos parâmetros morfológicos de perímetro, área, circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity* obtidos pelo *software* ImageJ, visando a caracterização da protrusão da raiz primária, os resultados estão apresentados nas Tabelas 6 a 11.

Os resultados de perímetro das sementes do cultivar A, referentes aos tratamentos 20 °C / 30h e 25 °C / 24h, evidenciaram maiores valores para os lotes A1, A5, A8 e A9 e menor valor para o lote A3 (Tabela 6). Nas condições a 25 °C / 30h, os lotes A1, A8 e A9 apresentaram maiores valores e os lotes A4, A6 e A7 menores valores. Para o tratamento 20 °C / 48h, o lote A1 apresentou maior valor e os lotes A4, A6 e A7 apresentaram menores valores. Nas condições a 30 °C / 24h, os lotes A1 e A2 apresentaram maiores valores e os lotes A4, A6 e A7 menores valores. Já no tratamento 30 °C / 30h, o lote A1 apresentou maior valor e os lotes A4, A6 e A7 menores valores. Os tratamentos 20 °C / 48h e 30 °C / 30h apresentaram resultados mais próximos quanto à separação dos lotes em relação aos testes de vigor tradicionais, pois os maiores percentuais de protrusão de raiz primária foram obtidos nos lotes A1, A2 e A3.

Com relação ao cultivar B, os resultados referentes aos tratamentos 30 °C / 24h e 30 °C / 30h evidenciaram maiores valores de perímetro para os lotes B1, B2, B4, B6, B8 e B10 em relação aos demais lotes. Para o tratamento 20 °C / 30h, os lotes B2, B4, B6 e B10 apresentaram maiores valores e o lote B5 apresentou menor valor. No tratamento 20 °C / 48h, os lotes B2, B4, B6, B8 e B10

apresentaram maiores valores e os lotes B3, B5 e B9 menores valores. Nas condições a 25 °C / 24h, os lotes B2, B4, B6, B8 e B10 apresentaram maiores valores de perímetro em relação aos demais lotes. Já para o tratamento 25 °C / 30h, os lotes B4, B6, B7 e B8 apresentaram resultados superiores em relação aos demais lotes.

Os resultados da área das sementes do cultivar A, referentes aos tratamentos 20 °C / 30h, 20 °C / 48h e 25 °C / 24h, revelaram maiores valores para os lotes A1, A5, A8 e A9 e menor valor para o lote A3 (Tabela 7). Para o tratamento 25 °C / 30h, os lotes A1, A2, A5, A8 e A9 apresentaram maiores valores em comparação aos demais lotes. No tratamento 30 °C / 24h, os lotes A1, A5, A8 e A9 apresentaram maiores valores em relação aos demais lotes. Já a 30 °C / 30h, os lotes A8 e A9 apresentaram maiores valores e os lotes A3, A4, A6 e A7 apresentaram menores valores.

Para o cultivar B, em todos os tratamentos, o lote B2 apresentou maiores valores de área das sementes e o lote B5 menor valor. Assim como ocorreu para os lotes do cultivar A, essa classificação foi semelhante à observada para os resultados de perímetro e não correspondeu à classificação dos lotes nos testes de vigor tradicionais (melhor e pior desempenho para os lotes B6 e B9, respectivamente) e na avaliação da protrusão da raiz primária. O tratamento 20 °C / 30h apresentou maiores variações nos resultados dos lotes do cultivar B, este tratamento apresentou menores porcentuais de protrusão de raiz primária e não apresentou semelhanças na classificação dos lotes com os demais testes.

No geral, a determinação do perímetro e área das sementes dos dois cultivares não apresentou eficiência na classificação dos lotes de maneira semelhante em relação aos demais testes de vigor (Tabelas 1, 2, 3 e 4) e à protrusão da raiz primária (Tabela 5). Uma provável associação entre as alterações no perímetro e área e o potencial fisiológico das sementes seria relacionada à primeira fase do processo de embebição, ou seja, absorção de água pelo tegumento. Sementes mais deterioradas apresentam membranas celulares mais desestruturadas facilitando a embebição inicial mais rápida das sementes, ocasionando aumento do volume e, consequentemente, do perímetro e área. Nos tratamentos 20 °C / 30h, 25 °C / 24h e 25 °C / 30h os lotes A5, A8 e A9 com maiores valores de perímetro estavam entre os lotes de menor potencial fisiológico.

Comparando os resultados de área com as porcentagens de protrusão da raiz primária no tratamento 20 °C / 30h, o lote B2 apresentou menor porcentagem, porém, os resultados de área apresentaram os maiores valores, logo, o lote B5, apresentou maior porcentagem e em relação a área apresentou menores valores, indicando novamente que a determinação de área não é um bom parâmetro para indicar a protrusão da raiz primária. Entretanto, nos mesmos tratamentos, o lote A1, de alto potencial fisiológico, apresentou maior valor de perímetro e área. Esses resultados indicam que os parâmetros de perímetro e área não representam parâmetros seguros para identificar alterações nas sementes associadas ao vigor, e também, para caracterizar a protrusão da raiz primária de sementes de soja.

Em sementes de tomate, Oliveira *et al.* (2021), utilizando o *software* ImageJ, também verificaram que a determinação da área das sementes não foi eficiente para caracterizar a protrusão da

raiz primária e não apresentou relação com os resultados dos testes tradicionais de vigor. Entretanto, os autores relataram que a uniformidade do tamanho das sementes de um mesmo lote pode ter influenciado na diferenciação dos lotes em níveis de vigor. Por outro lado, em sementes de couve-flor, a avaliação do aumento de área com o tempo de embebição permitiu avaliar as alterações morfológicas desde a embebição até o início da germinação (Dell'Aquila, 2009).

Tabela 6. Resultados de perímetro de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na primeira época de avaliação.

	Perímetro (mm)[2]					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	35,42 A	44,68 A	35,50 A	38,51 A	39,65 A	54,87 A
A2	33,34 B	42,34 B	33,89 B	38,43 B	38,64 A	51,23 B
A3	32,03 C	41,47 B	32,10 C	36,22 B	37,40 B	48,25 C
A4	33,08 B	36,31 D	33,66 B	34,95 C	34,45 C	39,65 E
A5	35,58 A	38,24 C	35,53 A	36,75 B	37,16 B	41,91 D
A6	33,23 B	35,93 D	33,55 B	34,88 C	34,98 C	40,62 E
A7	32,92 B	35,47 D	33,07 B	34,46 C	34,61 C	38,43 E
A8	35,58 A	39,17 C	35,47 A	37,67 A	37,25 B	43,54 D
A9	35,66 A	37,63 C	35,17 A	37,70 A	36,95 B	43,33 D
Média	34,09	39,03	34,30	36,38	36,79	44,65
CV (%)	1,14	3,14	1,90	2,18	3,10	4,51
			Cultivar B			
B1	36,23 C	50,25 B	38,78 B	46,70 B	45,05 A	66,58 A
B2	38,59 A	54,22 A	42,09 A	48,56 B	45,33 A	64,68 A
B3	35,46 C	47,24 C	39,93 B	47,76 B	43,83 B	56,86 B
B4	37,63 A	56,21 A	43,81 A	52,85 A	47,07 A	71,43 A
B5	34,65 D	46,55 C	39,53 B	49,22 B	42,03 B	57,79 B
B6	37,94 A	55,36 A	41,78 A	53,48 A	47,03 A	67,07 A
B7	37,02 B	51,13 B	39,95 B	53,50 A	42,73 B	59,30 B
B8	36,00 C	55,89 A	42,14 A	51,00 A	44,97 A	63,40 A
B9	36,71 B	47,63 C	40,74 B	47,42 B	42,93 B	56,13 B
B10	37,52 A	55,36 A	42,34 A	50,11 B	46,18 A	64,36 A
Média	36,77	51,98	41,11	50,06	44,72	62,76
CV (%)	2,23	4,85	3,39	5,21	4,12	7,97

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [1] Dados transformados em arc sen $(x/100)^{1/2}$, [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Tabela 7. Resultados de área de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na primeira época de avaliação.

	Área (mm²)[2]					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	84,83 A	86,79 A	82,22 A	78,96 A	86,33 A	92,33 B
A2	75,49 B	81,91 B	74,88 B	78,96 A	78,64 B	86,16 C
A3	69,60 C	73,31 D	67,67 C	72,20 B	72,89 C	80,83 D
A4	74,44 B	77,15 C	75,18 B	75,45 B	74,27 C	79,26 D
A5	85,65 A	87,95 A	83,98 A	84,35 A	85,20 A	90,08 B
A6	74,65 B	76,89 C	74,53 B	73,65 B	74,93 C	80,40 D
A7	73,87 B	75,58 C	72,92 B	74,32 B	74,30 C	80,09 D
A8	85,57 A	89,38 A	82,89 A	87,19 A	84,97 A	93,79 A
A9	85,84 A	85,72 A	84,81 A	86,08 A	83,22 A	95,51 A
Média	86,04	81,63	77,65	80,21	79,42	86,50
CV (%)	2,68	2,57	3,14	2,97	2,72	2,31
			Cultivar B			
B1	83,49 C	95,24 C	85,11 C	92,59 C	89,90 B	108,63 B
B2	95,99 A	108,55 A	98,39 A	102,75 A	101,64 A	118,81 A
B3	82,89 C	93,66 C	86,67 C	93,59 C	91,37 B	100,36 C
B4	85,47 C	97,55 C	91,20 B	97,67 B	91,03 B	110,02 B
B5	77,25 D	85,46 D	79,48 D	86,92 D	80,92 C	91,64 D
B6	87,51 B	97,35 C	89,65 B	98,42 B	91,46 B	106,31 C
B7	87,95 B	96,47 C	89,44 B	101,45 A	88,70 B	102,65 C
B8	84,76 C	100,72 B	90,79 B	98,44 B	92,73 B	103,39 C
B9	87,72 B	96,39 C	92,18 B	95,43 C	91,41 B	102,07 C
B10	87,32 B	100,79 B	90,61 B	93,50 C	92,35 B	105,24 C
Média	86,04	97,24	89,35	96,08	91,15	104,91
CV (%)	2,76	2,97	2,87	2,77	3,55	4,53

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Com relação aos resultados de circularidade das sementes do cultivar A, não foram observadas diferenças entre os lotes para os tratamentos 20 °C / 30h e 25 °C / 24h (Tabela 8). Porém, com exceção do tratamento 25 °C / 30h, nas demais condições avaliadas os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 apresentaram maiores valores em relação aos lotes A1, A2 e A3.

Nas condições de germinação a 20 °C / 48h e 30 °C / 24h foram obtidos resultados semelhantes na separação dos lotes em relação aos testes de vigor tradicionais (Tabela 1), todos os parâmetros avaliados na análise Vigor-S tradicional (Tabela 2), índice de vigor da análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional e todos parâmetros avaliados na análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, pois os maiores porcentuais de protrusão de

raiz primária foram obtidos nos lotes A1, A2 e A3 e também os maiores valores de circularidade. Conforme apresentado na Figura 3, a circularidade é definida pela relação entre a área e o quadrado do perímetro da semente. Considerando dois objetos com mesma área, mas com diferenças no perímetro (devido à rugosidade), a tendência é menor valor de circularidade naquele com maior rugosidade, ou seja, com maior perímetro. Porém, as imagens das plântulas de soja com emissão de raiz primária apresentam perímetro sem rugosidades de modo que a relação entre área e o perímetro tende a aumentar conforme o crescimento da raiz primária.

Quanto ao cultivar B, foram observadas diferenças entre os lotes para todos os tratamentos. Para os tratamentos 30 °C / 24h e 30 °C / 30h, os lotes B2, B3, B7 e B9 apresentaram maiores valores em relação aos demais lotes avaliados. Nas condições a 20 °C / 30h, os lotes B1, B2, B3, B5, B7, B8 e B9 apresentaram maiores valores em comparação com os demais lotes. Já no tratamento 20 °C / 48h, os lotes B3 e B9 apresentaram maiores valores e os lotes B4, B6, B8 e B10 apresentaram menores valores. Nas condições a 25 °C / 24h foram observados maiores valores de circularidade para os lotes B1, B2, B3, B7 e B9 em relação aos demais lotes. Em 25 °C / 30h os lotes B1, B2, B3 e B9 foram superiores em relação aos demais lotes.

Todos os tratamentos do parâmetro circularidade foram eficientes para separar os lotes B6 e o B9 com o mais vigoroso e o menos vigoroso, respectivamente. Esses resultados também foram encontrados nos testes de envelhecimento acelerado tradicional, condutividade elétrica, vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio, índice de velocidade de emergência (Tabela 1), todos os parâmetros fornecidos pela análise Vigor-S tradicional (Tabela 2) e todos os parâmetros avaliados pela análise Vigor-S após envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl (Tabela 4), todos os tratamentos obtidos na avaliação visual da protrusão da raiz primária (Tabela 5).

Tabela 8. Resultados de circularidade de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na primeira época de avaliação.

	Circularidade[2]					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	0,85 A	0,59 A	0,82 A	0,75 B	0,71 A	0,43 A
A2	0,85 A	0,60 A	0,82 A	0,79 C	0,68 A	0,47 B
A3	0,85 A	0,58 A	0,82 A	0,71 A	0,68 A	0,50 B
A4	0,85 A	0,74 B	0,83 A	0,78 C	0,78 B	0,65 C
A5	0,85 A	0,76 B	0,83 A	0,79 C	0,78 B	0,66 C
A6	0,85 A	0,75 B	0,83 A	0,76 C	0,77 B	0,63 C
A7	0,85 A	0,75 B	0,83 A	0,79 C	0,78 B	0,69 C
A8	0,85 A	0,74 B	0,82 A	0,78 C	0,77 B	0,64 C
A9	0,85 A	0,76 B	0,81 A	0,76 C	0,77 B	0,65 C
Média	0,85	0,69	0,82	0,76	0,75	0,59
CV (%)	0,81	3,61	1,70	2,71	3,56	6,29
			Cultivar B			
B1	0,80 B	0,49 B	0,72 B	0,56 B	0,58 A	0,34 A
B2	0,81 B	0,48 B	0,71 B	0,57 B	0,64 B	0,39 B
B3	0,83 B	0,55 C	0,69 B	0,53 B	0,62 B	0,43 B
B4	0,76 A	0,42 A	0,61 A	0,46 A	0,54 A	0,30 A
B5	0,81 B	0,52 B	0,65 A	0,47 A	0,60 A	0,37 A
B6	0,77 A	0,42 A	0,66 A	0,47 A	0,55 A	0,33 A
B7	0,81 B	0,49 B	0,71 B	0,47 A	0,64 B	0,41 B
B8	0,82 B	0,43 A	0,65 A	0,50 A	0,60 A	0,37 A
B9	0,82 B	0,56 C	0,70 B	0,56 B	0,64 B	0,45 B
B10	0,78 A	0,44 A	0,65 A	0,50 A	0,57 A	0,36 A
Média	0,80	0,48	0,68	0,51	0,60	0,38
CV (%)	2,34	8,35	4,96	7,99	6,01	13,68

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Dessa forma, os resultados de circularidade das sementes permitiram caracterizar a protrusão da raiz primária de sementes de soja. Este pode ser um parâmetro importante para ser integrado em algoritmos de processamento de imagens com o objetivo da automatização das análises de vigor. Segundo Dell'Aquila (2004b), além da área, a circularidade foi eficiente para identificar o início da germinação de sementes de repolho, com a vantagem de ser verificado em cada semente individualmente dentro de um lote de sementes.

Com relação ao *aspect ratio* (Tabela 9) e redondeza (*roundness*) (Tabela 10) foi obtida a mesma discriminação dos lotes nos diferentes tratamentos para ambos os cultivares.

Os resultados de *aspect ratio* e *roundness* das sementes do cultivar A, referentes aos tratamentos 25 °C / 24h e 30 °C / 24h evidenciaram menores valores de *aspect ratio* para os lotes A1, A2 e A3 em relação aos demais lotes (Tabela 9) e maiores valores de *roundness* para os lotes A1, A2 e A3 (Tabela 10). Isso ocorreu porque o *aspect ratio* possui relação inversa com *roundness*, ou seja, o valor do *aspect ratio* dobra quando o valor de *roundness* diminui pela metade. Assim, quando há protrusão da raiz primária ocorre diminuição do *aspect ratio* e redução do *roundness* em comparação à semente que não emitiu a raiz primária. No tratamento 20 °C / 30h, os lotes A1, A2, A3 e A7 foram observados menores e maiores valores para o *aspect ratio* e *roundness*, respectivamente, em comparação com os demais lotes. Já no tratamento 20 °C / 48h, apenas os lotes A1 e A2 apresentaram menores e maiores valores para o *aspect ratio* e *roundness* em comparação com o restante dos lotes. No tratamento 25 °C / 30h menores e maiores valores para o *aspect ratio* e *roundness* foram obtidos para os lotes A1 e A3 em comparação aos lotes A2, A5, A7, A8 e A9. Nas condições de 30 °C / 30h os resultados foram contrários em comparação a 25 °C / 24h e 30 °C / 24h, ou seja, os lotes A1, A2 e A3 apresentaram maiores valores de *aspect ratio* e menores valores de *roundness* em relação aos demais lotes.

Os resultados contrários do tratamento 30 °C / 30h estão associados ao fato que o *software* ImageJ interpreta a elipse circunscrita da semente ou plântula com a protrusão da raiz primária, conforme representado na Figura 3. Assim, quando ocorre a protrusão da raiz primária a elipse circunscrita apresenta um eixo maior e um eixo menor com diferente proporção, evidenciando maior razão entre os diâmetros da elipse. Com temperatura mais alta e maior tempo de germinação, as raízes apresentam maiores e a elipse circunscrita apresenta mais alongada tornando desproporcional a razão entre os eixos da elipse. Varela *et al*. (2005) relataram que altas temperaturas afetam a velocidade de absorção de água e as atividades enzimáticas, expressando o máximo do potencial germinativo das sementes.

Com relação aos resultados de *aspect ratio* e *roundness* para o cultivar B (Tabelas 9 e 10), nos tratamentos 20 °C / 30h, os lotes B4, B5, B6, B7 e B10 apresentaram menores e maiores valores para o *aspect ratio* e *roundness*, respectivamente em comparação com o restante dos lotes. No tratamento 20 °C / 48h os lotes B1, B2, B3, B5, B7 e B9 apresentaram menores e maiores valores de *aspect ratio* e *roundness*, respectivamente em relação aos lotes B4, B6, B8 e B10. Na condição a 25 °C / 24h, os lotes B4, B5 e B8 tiveram menores e maiores valores de *aspect ratio* e *roundness*, respectivamente em relação aos demais lotes. No tratamento 25 °C / 30h, os lotes B6 e B7 apresentaram menores e maiores valores de *aspect ratio* e *roundness*, respectivamente em comparação aos demais lotes. Já no tratamento 30 °C / 30h, os resultados foram contrários assim como observado para o cultivar A, com os lotes B1, B4, B6 e B10 apresentaram maiores e menores valores de *aspect ratio* e *roundness*, respectivamente em comparação aos demais lotes. Não foram observadas diferenças significativas entre os lotes para o tratamento 30 °C / 24h.

Analisando os resultados de *aspect ratio* e *roundness* das sementes do cultivar A correspondentes aos tratamentos 25 °C / 24h e 30 °C / 24h observa-se que os lotes foram classificados

de maneira semelhante aos testes tradicionais, todos os parâmetros avaliados na análise Vigor-S tradicional, índice de vigor da análise Vigor-S após envelhecimento acelerado tradicional e todos parâmetros avaliados pela análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl (Tabelas 2 e 3), o tratamento 30 °C / 24h da porcentagem de plântulas com protrusão da raiz primária (Tabela 5), e nos tratamentos 20 °C / 48h e 30 °C / 24h do parâmetro circularidade (Tabela 8).

Para o cultivar B, também foi observada relação semelhante na separação dos lotes utilizando os parâmetros *aspect ratio* e *roundness* com os testes tradicionais para avaliação de vigor. O tratamento 20 °C / 30h foi eficiente para discriminar os lotes de maneira semelhante aos testes de envelhecimento acelerado tradicional, condutividade elétrica, vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio, índice de velocidade de emergência (Tabela 1), todos os parâmetros fornecidos pela análise Vigor-S tradicional (Tabela 2) e todos os parâmetros avaliados pelo Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl (Tabela 4), todos os tratamentos obtidos na avaliação visual da protrusão da raiz primária (Tabela 5), em todos os tratamentos do parâmetro circularidade (Tabela 8).

O *aspect ratio* e *roundness* foram mais consistentes em comparação ao perímetro e a área na caracterização da protrusão da raiz primária na avaliação do vigor de sementes de soja, pois apresentaram resultados condizentes com os demais testes realizados para os dois cultivares avaliados. Em sementes de tomate Oliveira *et al.* (2021) também verificaram eficiência do *aspect ratio* para caracterizar a protrusão da raiz primária na avaliação do vigor; a protrusão da raiz primária foi caracterizada pelo aumento dos valores do parâmetro.

Tabela 9. Resultados de relação de aspecto (*aspect ratio* - AR) de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na primeira época de avaliação.

	AR[2]					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	1,42 A	1,32 A	1,43 A	1,33 A	1,32 A	1,57 B
A2	1,45 A	1,30 A	1,40 A	1,47 C	1,34 A	1,58 B
A3	1,46 A	1,38 B	1,44 A	1,33 A	1,35 A	1,53 B
A4	1,48 B	1,39 B	1,47 B	1,43 B	1,44 B	1,32 A
A5	1,51 B	1,43 B	1,50 B	1,47 C	1,46 B	1,36 A
A6	1,50 B	1,40 B	1,49 B	1,41 B	1,45 B	1,30 A
A7	1,47 A	1,41 B	1,50 B	1,46 C	1,46 B	1,35 A
A8	1,51 B	1,40 B	1,48 B	1,45 C	1,46 B	1,33 A
A9	1,50 B	1,44 B	1,50 B	1,46 C	1,47 B	1,34 A
Média	1,48	1,39	1,47	1,40	1,42	1,41
CV (%)	2,18	2,91	2,13	2,15	2,56	4,61
			Cultivar B			
B1	1,50 B	1,35 A	1,39 B	1,30 A	1,33 A	1,91 B
B2	1,50 B	1,30 A	1,38 B	1,32 A	1,34 A	1,67 A
B3	1,51 B	1,29 A	1,39 B	1,32 A	1,31 A	1,67 A
B4	1,46 A	1,51 B	1,31 A	1,35 A	1,34 A	2,03 B
B5	1,43 A	1,34 A	1,32 A	1,36 A	1,32 A	1,72 A
B6	1,40 A	1,42 B	1,36 B	1,44 B	1,33 A	1,81 B
B7	1,45 A	1,34 A	1,40 B	1,38 B	1,37 A	1,65 A
B8	1,49 B	1,44 B	1,32 A	1,34 A	1,34 A	1,75 A
B9	1,49 B	1,29 A	1,38 B	1,32 A	1,34 A	1,53 A
B10	1,44 A	1,39 B	1,36 B	1,34 A	1,32 A	1,82 B
Média	1,46	1,37	1,36	1,35	1,39	1,75
CV (%)	2,86	5,28	2,70	3,92	3,37	8,93

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Tabela 10. Resultados de redondeza (*roundness*) de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na primeira época de avaliação.

	***Roundness*[2]**					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	0,70 A	0,77 A	0,70 A	0,74 A	0,76 A	0,67 B
A2	0,69 A	0,78 A	0,71 A	0,68 C	0,75 A	0,66 B
A3	0,68 A	0,74 B	0,69 A	0,75 A	0,74 A	0,69 B
A4	0,67 B	0,72 C	0,68 B	0,70 B	0,70 B	0,76 A
A5	0,66 B	0,70 C	0,67 B	0,68 C	0,68 B	0,74 A
A6	0,67 B	0,71 C	0,67 B	0,71 B	0,69 B	0,77 A
A7	0,68 A	0,71 C	0,66 B	0,68 C	0,69 B	0,74 A
A8	0,67 B	0,71 C	0,67 B	0,69 C	0,68 B	0,75 A
A9	0,66 B	0,69 C	0,66 B	0,68 C	0,68 B	0,75 A
Média	0,67	0,72	0,68	0,70	0,71	0,72
CV (%)	2,15	2,78	2,12	2,01	2,61	3,82
			Cultivar B			
B1	0,67 B	0,75 A	0,72 B	0,78 A	0,78 A	0,57 B
B2	0,67 B	0,78 A	0,72 B	0,76 A	0,74 A	0,63 A
B3	0,66 B	0,78 A	0,72 B	0,76 A	0,78 A	0,64 A
B4	0,69 A	0,68 B	0,76 A	0,75 A	0,76 A	0,53 B
B5	0,70 A	0,75 A	0,76 A	0,74 A	0,78 A	0,62 A
B6	0,71 A	0,72 B	0,74 A	0,71 B	0,78 A	0,60 B
B7	0,69 A	0,75 A	0,72 B	0,73 B	0,74 A	0,64 A
B8	0,68 B	0,71 B	0,76 A	0,75 A	0,74 A	0,61 A
B9	0,67 B	0,78 A	0,72 B	0,77 A	0,76 A	0,69 A
B10	0,70 A	0,73 B	0,74 A	0,75 A	0,78 A	0,58 B
Média	0,68	0,74	0,74	0,75	0,76	0,62
CV (%)	2,84	4,68	2,72	3,42	3,19	8,08

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Com relação aos resultados de solidez (*solidity*) referentes às sementes do cultivar A, não foram observadas diferenças entre os lotes no tratamento 25 °C / 24h (Tabela 11). Por outro lado, nos demais tratamentos ocorreram diferenças significativas, os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 apresentaram maiores valores de *solidity* em relação aos demais lotes.

Quanto aos resultados de *solidity* das sementes do cultivar A, os lotes mais vigorosos (A1, A2 e A3) apresentaram semelhante classificação nos tratamentos 20 °C / 30h, 20 °C / 48h e 30 °C / 24h, em comparação com a classificação dos lotes nos testes tradicionais de vigor e análise pelo Vigor-S (Tabelas 1 e 2), análise Vigor-S após o teste de envelhecimento com solução saturada de NaCl, e no índice de vigor da análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional (Tabelas 2 e 3), e nos

tratamentos 20 °C / 48h e 30 °C / 24h do parâmetro circularidade (Tabela 8), e em 25 °C / 24h e 30 °C / 24h do parâmetro *aspect ratio* (Tabela 9) e para o parâmetro *roundness* (Tabela 10). Essa semelhança na separação dos lotes de maior vigor foi associada com menores valores de *solidity*, pois com o crescimento da raiz primária ocorre aumento da área convexa, que é utilizada no denominador da equação para o cálculo da *solidity* (Figura 3).

Quanto ao cultivar B, foram observadas diferenças entre os lotes para todos os tratamentos. Na condição de germinação a 20 °C / 30h, os lotes B4, B6 e B10 apresentaram menores valores de *solidity* em comparação com os demais lotes. No tratamento 20 °C / 48h, os lotes B4, B6, B8 e B10 apresentaram menores valores em relação aos demais lotes. Para o tratamento 25 °C / 24h, o lote B4 apresentou menores valores e os lotes B1, B2, B3, B7 e B9 maiores valores. Já no tratamento 25 °C / 30h, os lotes B1, B2, B3 e B9 apresentaram maiores valores em comparação com os demais lotes. Nas condições a 30 °C / 24h, os lotes B1, B4, B6 e B10 apresentaram menores valores em relação aos demais lotes. A 30 °C / 30h, os lotes B4 e B6 apresentaram menores valores e os lotes B2, B3, B7 e B9 apresentaram maiores valores.

Para o cultivar B, em todos os tratamentos do parâmetro *solidity* o lote B9 foi discriminado com desempenho inferior e o lote B6 com desempenho superior, com exceção do tratamento 25 °C / 24h que o lote B4 apresentou maior valor de *solidity*. Esses tratamentos apresentaram a mesma separação nos testes de vigor tradicional e nas análise Vigor-S (Tabelas 1 e 2), análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl (Tabela 4), todos os tratamentos obtidos na avaliação visual da protrusão da raiz primária (Tabela 5), em todos os tratamentos do parâmetro circularidade (Tabela 8), em 20 °C / 30h do parâmetro *aspect ratio* (Tabela 9), em 20 °C / 30h e 25 °C / 24h do parâmetro *roundness* (Tabela 10).

Tabela 11. Resultados de solidez (*solidity*) de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na primeira época de avaliação.

	***Solidity*[2]**					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	0,96 A	0,83 A	0,95 A	0,91 B	0,89 A	0,73 A
A2	0,96 A	0,84 A	0,94 A	0,93 C	0,88 A	0,75 B
A3	0,96 A	0,82 A	0,94 A	0,89 A	0,88 A	0,78 B
A4	0,97 B	0,91 B	0,95 A	0,92 C	0,93 B	0,87 C
A5	0,97 B	0,92 B	0,95 A	0,93 C	0,93 B	0,88 C
A6	0,97 B	0,91 B	0,95 A	0,92 C	0,92 B	0,87 C
A7	0,97 B	0,91 B	0,95 A	0,93 C	0,93 B	0,89 C
A8	0,97 B	0,91 B	0,95 A	0,93 C	0,93 B	0,87 C
A9	0,97 B	0,92 B	0,95 A	0,92 C	0,93 B	0,87 C
Média	0,94	0,88	0,95	0,92	0,91	0,84
CV (%)	0,91	1,60	0,67	1,14	1,40	2,60
			Cultivar B			
B1	0,94 B	0,78 B	0,90 C	0,81 B	0,83 A	0,67 B
B2	0,95 B	0,78 B	0,90 C	0,83 B	0,87 B	0,71 C
B3	0,95 B	0,81 B	0,89 C	0,81 B	0,85 B	0,74 C
B4	0,92 A	0,72 A	0,84 A	0,75 A	0,82 A	0,63 A
B5	0,94 B	0,79 B	0,87 B	0,76 A	0,84 B	0,69 B
B6	0,92 A	0,72 A	0,88 B	0,75 A	0,81 A	0,65 A
B7	0,95 B	0,78 B	0,90 C	0,76 A	0,86 B	0,71 C
B8	0,95 B	0,73 A	0,87 B	0,78 A	0,84 B	0,69 B
B9	0,95 B	0,82 B	0,90 C	0,81 B	0,87 B	0,75 C
B10	0,93 A	0,73 A	0,87 B	0,77 A	0,82 A	0,68 B
Média	0,94	0,77	0,88	0,78	0,85	0,70
CV (%)	0,95	3,32	2,18	3,37	2,47	5,44

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Com base nos resultados já discutidos, os parâmetros morfológicos circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity* apresentaram eficiência na discriminação dos lotes de maior vigor (A1, A2 e A3) que apresentaram melhor desempenho em relação aos demais lotes, sendo que o tratamento 30 °C / 24h apresentou a melhor condição para proporcionar a protrusão da raiz primária que permitisse a separação dos lotes.

Para o cultivar B, os lotes B6 e B9 apresentaram melhor e pior desempenho, respectivamente. Essa classificação dos lotes pode ser observada pelos parâmetros de circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity*, sendo que o tratamento 20 °C / 30h apresentou a melhor condição para proporcionar a protrusão da raiz primária.

Diante do exposto, os parâmetros morfológicos circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity* obtidos pelo *software* ImageJ apresentaram sensibilidade na detecção de diferenças de vigor entre os lotes de sementes de soja dos dois cultivares**,** pois os resultados mostraram coerência com a classificação obtida em praticamente todos os testes conduzidos.

4.2 Segunda época de avaliação

4.2.1. Avaliação do potencial fisiológico das sementes

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados do teor de água inicial, teor de água após os testes de envelhecimento acelerado e do potencial fisiológico das sementes dos dois cultivares. Na segunda época de avaliação o teor de água inicial das sementes variou de 5,8% a 6,5% para o cultivar A e 6,0% a 6,6% para o cultivar B; após o envelhecimento acelerado tradicional o teor de água variou de 23,8% a 25,5% e 22,3% a 26,4% e, após o envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, de 11,7 a 12,3% e 10,5% a 12,2% para o cultivar A e B, respectivamente. Assim como observado na primeira época, após o teste de envelhecimento acelerado tradicional a variação do teor de água das sementes entre os lotes do cultivar B foi superior a 4 pontos percentuais, o que pode comprometer a consistência dos resultados por aumentar o grau de deterioração das sementes com teores de água mais elevados. Porém, após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, os resultados do teor de água apresentaram menor variabilidade entre os lotes para ambos os cultivares, representando maior confiabilidade dos resultados.

Tabela 12. Teores de água inicial, após o envelhecimento acelerado tradicional (T.A. EAT 48h) e após o envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl (T.A. EASS 72h), germinação (G), primeira contagem de germinação (PCG), envelhecimento acelerado tradicional (EAT 48h) e com solução saturada de NaCl (EASS 72h), condutividade elétrica, vigor (VIG) e viabilidade (VIAB) avaliados pelo teste de tetrazólio, emergência de plântulas em campo (EPC) e índice de velocidade de emergência (IVE), em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na segunda época de avaliação.

Lotes	TA.	TA. EAT	TA. EASS	G[1]	PCG[1]	EAT[1]	EASS[1]	CE[2]	VIG[1]	VIAB[1]	EPC[1]	IVE[2]
		----------	----------	%	----------	----------		$\mu S.cm^{-1}.g^{-1}$	----------	%	----------	índice
						Cultivar A						
A1	6,0	23,8	11,7	97 A	97 A	85 A	96 A	81,21 A	93 A	97 A	92 A	10,13 A
A2	6,3	24,7	12,0	96 A	96 A	86 A	96 A	72,68 A	94 A	97 A	93 A	8,98 A
A3	6,5	24,2	12,1	99 A	98 A	82 A	97 A	74,14 A	92 A	97 A	96 A	10,70 A
A4	6,4	25,2	11,8	91 B	91 B	42 B	85 D	130,67 C	86 B	92 B	66 B	6,08 B
A5	6,3	24,2	12,3	91 B	89 B	24 C	84 D	128,22 C	80 C	89 C	62 B	5,45 B
A6	6,3	24,0	12,0	97 A	97 A	24 C	92 B	114,97 B	85 B	93 B	66 B	5,56 B
A7	6,0	24,6	11,9	94 B	93 B	18 C	89 C	133,56 C	84 B	94 B	64 B	5,33 B
A8	5,8	25,5	11,9	93 B	93 B	15 D	84 D	132,87 C	82 C	91 B	55 B	4,84 B
A9	6,0	25,2	11,9	91 B	91 B	7 E	90 C	129,62 C	79 C	88 C	66 B	5,36 B
Média	-	-	-	94,0	93,8	42,4	90,3	110,88	85,8	93,0	73,00	6,94
CV (%)	-	-	-	3,98	3,65	13,81	3,31	6,62	2,28	1,46	13,37	13,47
						Cultivar B						
B1	6,3	22,8	11,8	99 A	99 A	96 A	96 A	81,21 B	97 A	99 A	91 A	9,99 A
B2	6,2	22,3	11,6	99 A	99 A	93 A	98 A	70,92 A	92 B	97 A	92 A	9,49 A
B3	6,5	23,8	11,7	99 A	99 A	86 A	96 A	89,12 C	92 B	94 B	92 A	10,17 A
B4	6,2	23,5	11,9	96 A	95 A	95 A	95 A	80,51 B	92 B	95 B	94 A	10,16 A
B5	6,0	24,5	12,1	98 A	98 A	88 A	97 A	85,93 B	89 C	94 B	92 A	10,53 A
B6	6,0	22,8	11,7	95 A	95 A	94 A	97 A	85,94 B	97 A	98 A	91 A	10,49 A
B7	6,3	23,5	11,8	99 A	99 A	95 A	98 A	95,33 C	96 A	97 A	92 A	10,50 A
B8	6,0	24,2	12,2	99 A	99 A	92 A	97 A	99,00 C	95 A	97 A	91 A	10,04 A
B9	6,5	23,5	11,9	99 A	99 A	67 B	95 A	101,60 C	91 B	95 B	88 A	8,70 A
B10	6,6	26,4	10,5	98 A	98 A	93 A	98 A	93,06 C	91 B	95 B	96 A	9,96 A
Média	-	-	-	97,9	97,9	89,5	96,5	88,26	93,0	95,8	91	10,00
CV (%)	-	-	-	2,54	2,45	6,46	2,81	8,31	1,57	1,24	6,81	7,91

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [1] Dados transformados em arc sen $(x/100)^{1/2}$, [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Para o cultivar A foram observadas diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre os lotes nas avaliações de potencial fisiológico (Tabela 12). O teste de germinação e a primeira contagem de germinação discriminaram os lotes A1, A2, A3 e A6 com desempenho superior em relação aos demais lotes. No teste de envelhecimento acelerado tradicional, os lotes A1, A2 e A3 apresentaram maiores valores, enquanto que o lote A9 apresentou menor valor. No teste de envelhecimento acelerado com

solução saturada de NaCl os lotes A1, A2 e A3 também apresentaram maiores valores e os lotes A4, A5 e A8 apresentaram menores valores.

Em relação ao teste de condutividade elétrica, os lotes A1, A2 e A3 apresentaram menores valores e os lotes A4, A5, A7, A8 e A9 os maiores valores. Quanto à viabilidade e ao vigor avaliados pelo teste de tetrazólio, os maiores valores foram obtidos para os lotes A1, A2 e A3. Os menores valores foram observados para os lotes A5 e A9 (viabilidade) e A5, A8 e A9 (vigor).

O teste de emergência de plântulas em campo e o índice de velocidade de emergência classificaram os lotes A1, A2 e A3 como os de mais vigorosos em comparação aos restantes dos lotes.

Portanto, de acordo com a Tabela 12, os testes de envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl, condutividade elétrica, vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio, emergência de plântulas em campo e índice de velocidade de emergência apresentaram informações semelhantes na identificação dos lotes de maior vigor do cultivar A.

Em relação ao cultivar B, não foram observadas diferenças significativas ($p \leq 0,05$) nos testes de germinação, primeira contagem de germinação, envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, emergência de plântulas em campo e índice de velocidade de emergência (Tabela 12). No teste de envelhecimento acelerado tradicional, o lote B9 apresentou pior desempenho em relação aos demais lotes.

No teste de condutividade elétrica, o lote B2 apresentou menor valor e os lotes B3, B7, B8, B9 e B10 evidenciaram maiores valores, indicando maior vigor do lote B2. O teste de vigor avaliado pelo teste de tetrazólio revelou maiores porcentagens para os lotes B1, B6, B7 e B8 e menor porcentagem para o lote B5. A viabilidade avaliada pelo teste de tetrazólio revelou melhor desempenho para os lotes B1, B2, B6, B7 e B8 em comparação com o restante dos lotes.

Nos testes de envelhecimento acelerado tradicional, condutividade elétrica e viabilidade avaliada pelo teste de tetrazólio foram obtidas informações semelhantes quanto à classificação do lote B9 como o de menor vigor em relação aos demais lotes.

A segunda época da condução do teste de emergência de plântulas em campo apresentou semelhança com a primeira época de avaliação nas variações de temperatura e umidade relativa do ar (Figura 5). Foram registradas baixas precipitação pluvial com média de 1,15 mm durante a condução do teste. Essa baixa precipitação pluvial foi suplementada com irrigação por aspersão para permitir o suprimento adequado de água para a germinação e emergência das plântulas. As temperaturas médias apresentaram acima de 25 °C nos primeiros sete dias (germinação e emergência), assim, não afetaram a velocidade da emergência das plântulas em campo (Tabela 12).

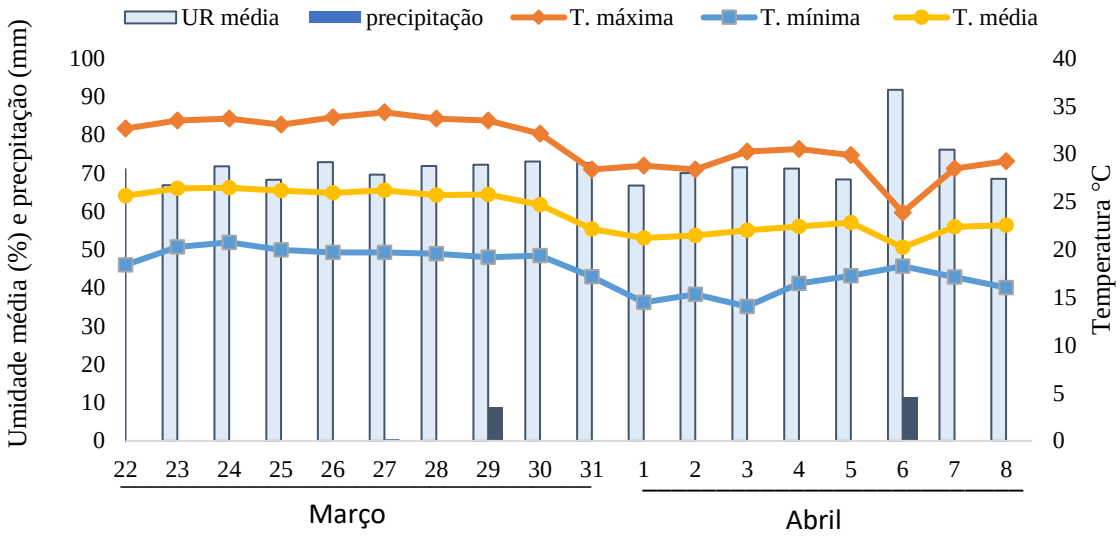


Figura 5. Variáveis climáticas: temperaturas máximas, médias e mínimas, umidade relativa do ar (UR) e precipitação pluvial durante a condução do teste de emergência em campo na segunda época de avaliação. Fonte – Base de dados da estação meteorológica automática área de agrometeorologia - LEB - ESALQ - USP - Piracicaba, SP, 2021.

De modo geral, com base nos resultados dos testes de germinação e de vigor referentes ao cultivar A, os lotes A1, A2 e A3 apresentaram potencial fisiológico superior aos demais lotes. Quanto ao cultivar B, os lotes B2 e B6 evidenciaram desempenho superior e o lote B9 apresentou desempenho inferior em relação aos demais lotes.

A comparação dos resultados obtidos na primeira época com os obtidos nesta época evidencia semelhança na discriminação dos lotes de maior vigor do cultivar A. Para o cultivar B, a separação dos lotes foi semelhante para os testes de germinação, primeira contagem de germinação, envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl, com os lotes B6 e B9 identificados como os de melhor e pior desempenho, respectivamente. Porém, nesta segunda época de avaliação o lote B2 também foi identificado com melhor desempenho.

Os resultados apresentados na Tabela 13 são referentes à análise computadorizada de imagens de plântulas (sistema Vigor-S) e nas Tabelas 14 e 15 encontram-se os resultados das análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl, respectivamente.

Tabela 13. Índices de vigor (IV) e de uniformidade de desenvolvimento (IU), comprimento médio de plântulas (CP), comprimento de hipocótilo (CH) e comprimento de raiz (CR) obtidos em análises Vigor-S, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na segunda época de avaliação.

Lotes	(IV)[2]	(IU)[2]	(CP)[2]	(CH)[2]	(CR)[2]
	----- índice -----		---------- cm ----------		
			Cultivar A		
A1	653 A	698 A	8,30 A	2,60 A	5,66 A
A2	722 A	786 A	9,06 A	2,83 A	6,22 A
A3	670 A	721 A	8,64 A	2,84 A	5,78 A
A4	331 C	602 B	3,58 C	1,71 B	1,85 C
A5	296 C	603 B	2,80 C	1,39 C	1,39 C
A6	384 B	613 B	4,42 B	1,90 B	2,47 B
A7	312 C	591 B	3,16 C	1,49 C	1,63 C
A8	313 C	576 B	3,18 C	1,45 C	1,72 C
A9	306 C	595 B	3,10 C	1,54 C	1,53 C
Média	442	642	5,13	1,97	3,15
CV (%)	10,43	9,20	12,24	12,76	14,90
			Cultivar B		
B1	817 A	818 A	9,60 A	2,13 A	7,44 A
B2	734 B	771 A	8,64 B	2,08 A	6,51 B
B3	697 B	749 A	8,46 B	2,34 A	6,08 B
B4	805 A	736 A	9,96 A	2,33 A	7,59 A
B5	790 A	729 A	10,00 A	2,60 A	7,38 A
B6	763 A	735 A	9,45 A	2,39 A	7,03 A
B7	785 A	812 A	9,38 A	2,33 A	7,01 A
B8	692 B	744 A	8,26 B	2,21 A	6,04 B
B9	673 B	670 A	8,26 B	2,22 A	6,04 B
B10	739 B	710 A	8,78 B	1,94 A	6,85 A
Média	749	747	9,07	2,27	6,80
CV (%)	8,55	9,38	8,31	12,22	9,80

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Tabela 14. Índices de vigor (IV) e de uniformidade de desenvolvimento (IU), comprimento médio de plântulas (CP), comprimento de hipocótilo (CH) e comprimento de raiz (CR) obtidos em análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional e envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A), na segunda época de avaliação

EAT (41°C/48h)						
Lotes	**(IV)[2]**	**(IU)[2]**	**(CP)[2]**	**(CH)[2]**	**(CR)[2]**	**T.A.EAT**
	----- índice -----		**---------- cm ----------**			**%**
A1	357 A	544 A	4,24 A	1,77 A	2,45 B	24,0
A2	364 A	465 A	4,78 A	1,99 A	2,80 A	25,0
A3	353 A	520 A	4,48 A	2,02 A	2,42 B	25,1
A4	183 B	551 A	0,74 B	0,52 B	0,18 C	24,9
A5	133 C	401 B	0,54 B	0,39 B	0,12 C	23,8
A6	170 B	472 A	0,80 B	0,44 B	0,33 C	25,4
A7	136 C	391 B	0,56 B	0,34 B	0,20 C	24,8
A8	133 C	386 B	0,58 B	0,37 B	0,19 C	24,3
A9	107 C	324 B	0,45 B	0,29 B	0,11 C	23,7
Média	215	450	1,90	0,90	0,98	-
CV (%)	18,78	22,91	18,32	19,01	23,10	-
EASS (41°C/72h)						
A1	596 A	713 A	7,34 A	2,47 A	4,86 A	12,4
A2	632 A	794 A	7,56 A	2,55 A	5,00 A	11,0
A3	628 A	749 A	7,68 A	2,55 A	5,13 A	12,3
A4	263 B	585 B	2,44 B	1,41 B	1,02 B	12,4
A5	255 B	590 B	2,16 B	1,23 C	0,91 B	11,9
A6	295 B	627 B	2,68 B	1,40 B	1,28 B	12,0
A7	265 B	611 B	2,16 B	1,16 C	0,97 B	11,9
A8	253 B	576 B	2,10 B	1,13 C	0,96 B	11,6
A9	248 B	556 B	2,16 B	1,17 C	0,96 B	11,8
Média	382	644	4,59	1,67	2,34	-
CV (%)	9,45	9,80	13,27	11,47	16,39	-

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Tabela 15. Índices de vigor (IV) e de uniformidade de desenvolvimento (IU), comprimento médio de plântulas (CP), comprimento de hipocótilo (CH) e comprimento de raiz (CR) obtidos em análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional e envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na segunda época de avaliação.

			EAT (41°C/48h)			
Lotes	**(IV)[2]**	**(IU)[2]**	**(CP)[2]**	**(CH)[2]**	**(CR)[2]**	**T.A.EAT**
	----- índice -----		**---------- cm ----------**			**%**
B1	666 B	792 A	8,08 B	2,58 A	5,47 B	24,7
B2	542 D	705 A	6,58 D	2,39 A	4,18 C	24,0
B3	416 E	692 A	4,44 E	1,85 B	2,59 E	25,5
B4	742 A	753 A	9,32 A	2,66 A	6,64 A	24,9
B5	520 D	679 A	6,08 D	2,05 B	4,02 C	25,9
B6	746 A	743 A	9,52 A	2,80 A	6,72 A	25,9
B7	615 C	717 A	7,24 C	2,06 B	5,15 B	24,7
B8	616 C	717 A	7,22 C	2,01 B	5,17 B	24,5
B9	430 E	546 B	5,12 E	1,71 B	3,39 D	24,8
B10	673 B	760 A	8,20 B	2,46 A	5,71 B	24,9
Média	597	710	7,18	2,26	4,90	-
CV (%)	7,44	8,51	7,54	10,79	8,96	-
			EASS (41°C/72h)			
B1	822 B	806 A	8,92 B	2,76 A	7,48 B	12,0
B2	733 C	795 A	8,84 B	2,48 B	6,36 C	11,8
B3	719 C	756 A	8,36 B	2,57 B	5,78 C	11,9
B4	844 B	783 A	10,46 A	2,57 B	7,90 B	11,6
B5	807 B	755 A	10,46 A	3,00 A	7,46 B	12,0
B6	871 B	790 A	11,00 A	2,80 A	8,21 B	11,9
B7	833 B	812 A	10,32 A	2,65 B	7,63 B	11,9
B8	866 B	825 A	10,54 A	2,49 B	8,03 B	11,9
B9	730 C	772 A	8,84 B	2,39 B	6,43 C	12,0
B10	937 A	830 A	11,96 A	2,81 A	9,16 A	11,8
Média	816	792	9,97	2,65	7,44	-
CV (%)	7,33	6,18	12,29	9,93	8,01	-

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Nas análises Vigor-S tradicional do cultivar A, todos os parâmetros avaliados apresentaram eficiência na identificação dos lotes de maior vigor. Para o índice de vigor, comprimento médio de plântulas e comprimento de raiz, os lotes A4, A5, A7, A8 e A9 apresentaram piores desempenhos e o lote A6 apresentou posição intermediária. No comprimento de hipocótilo, os lotes A5, A7, A8 e A9 mostraram desempenho inferior.

Em relação ao cultivar B, para o índice de uniformidade e comprimento de hipocótilo não foram observadas diferenças significativas. Entretanto, para o índice de vigor e comprimento médio de plântulas, os lotes B1, B4, B5, B6 e B7 apresentaram desempenho superior em relação aos demais lotes

e, para o comprimento de raiz, os lotes B1, B4, B5, B6, B7 e B10 evidenciaram desempenho superior em relação ao restante dos lotes.

Portanto, para as análises utilizando o sistema Vigor-S observou-se semelhança entre os parâmetros analisados na classificação dos lotes de melhor desempenho do cultivar A. Em relação aos testes de vigor tradicionais apresentados na Tabela 12, a análise Vigor-S forneceu resultados semelhantes na classificação dos lotes de maior vigor. Assim como observado na primeira época experimental, a análise Vigor-S apresentou eficiência na discriminação dos lotes.

Em relação ao cultivar B, os lotes B6 e B9 apresentaram melhor e pior desempenho, respectivamente. Os resultados obtidos na segunda época experimental são condizentes com os resultados obtidos na primeira época experimental (Tabela 2). Os testes que apresentaram semelhança na identificação dos lotes de maior e menor vigor foram os testes de envelhecimento acelerado tradicional, vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio e todos os parâmetros avaliados pelo Vigor-S, exceto o comprimento de hipocótilo.

Quanto às análises Vigor-S após o envelhecimento acelerado tradicional das sementes dos lotes do cultivar A, o índice de vigor separou os lotes A1, A2 e A3 como os de melhor desempenho e os lotes A5, A7, A8 e A9 com desempenho inferior. Para o comprimento médio de plântulas e comprimento de hipocótilo, os lotes A1, A2 e A3 apresentaram melhores desempenhos e os demais lotes com desempenhos inferiores. Quanto ao comprimento de raiz, o lote A2 apresentou maior valor e os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 apresentaram menores valores. Os resultados da análise Vigor-S após o envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl discriminaram os lotes A1, A2, A3 com desempenho superior em relação aos demais lotes pelo índice de vigor, comprimento médio de plântulas e comprimento de raiz. Para o comprimento de hipocótilo, os lotes A1, A2 e A3 apresentaram maiores valores e os lotes A5, A7, A8 e A9 apresentaram menores valores (Tabela 14).

Portanto, para o cultivar A, a análise Vigor-S após o envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl apresentou semelhança na identificação dos lotes de maior vigor para todos os parâmetros analisados com exceção do comprimento de raiz. Em relação aos resultados da primeira época experimental, foi possível evidenciar consistência das informações obtidas na análise Vigor-S após os testes de envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl na separação de lotes de maior e menor vigor.

Para o cultivar B, o índice de vigor e o comprimento médio de plântulas obtidos pelo Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional, discriminaram os lotes B4 e B6 como de melhor desempenho e os lotes B3 e B9 como de desempenho inferior. Para o comprimento de hipocótilo, os lotes B1, B2, B4, B6, e B10 apresentaram melhores desempenhos e os demais lotes desempenho inferior, enquanto que para o comprimento de raiz, os lotes B4 e B6 apresentaram melhores desempenhos e o lote B3 apresentou desempenho inferior (Tabela 15). Quanto à análise Vigor-S após o envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, os parâmetros de índice de vigor e comprimento de raiz discriminaram o lote B10 com o de maior valor em comparação com os lotes B2 e B3 que apresentaram

valores inferiores. Para o comprimento médio de plântulas, os lotes B4, B5, B6, B7, B8 e B10 apresentaram maiores valores em relação aos demais lotes. Para o comprimento de hipocótilo, os lotes B1, B5, B6 e B10 apresentaram desempenho superior em relação aos demais lotes.

Portanto, em relação ao cultivar B, considerando os parâmetros obtidos pela análise Vigor-S, os lotes B6 e B9 estiveram entre os lotes agrupados como de melhor e pior desempenho, respectivamente. Essa classificação foi identificada nos testes de envelhecimento acelerado tradicional, vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio e todos os parâmetros da análise Vigor-S tradicional, todos os parâmetros da análise Vigor-S após o envelhecimento acelerado tradicional, com exceção do comprimento de raiz e os parâmetros de comprimento de plântulas e comprimento de hipocótilo na análise Vigor-S após envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl.

Os resultados observados na primeira época experimental foram semelhantes quanto à discriminação dos lotes em diferentes níveis de vigor nas análises Vigor-S após envelhecimento acelerado tradicional e após o envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl. Porém, na segunda época experimental foi observada maior estratificação dos lotes na análise Vigor-S após envelhecimento acelerado tradicional em comparação com as demais análises.

O teor de água das sementes do cultivar A variou de 23,7% a 25,4% e 11,0% a 12,4% nas análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl, respectivamente (Tabela 14). Em relação ao cultivar B, as variações foram de 24,0% a 25,9% nas análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional e 11,6% a 12,0% nas análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl (Tabela 15). As variações obtidas do teor de água dos lotes nas análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl foram inferiores a 4 pontos percentuais, sendo possível afirmar que os resultados apresentaram confiabilidade.

Verificou-se redução do índice de vigor e comprimento médio de plântulas nas análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional em relação às análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl em ambos os cultivares. Esse fato está relacionado à maior umidade relativa no interior das caixas (próximo de 100%), causando deterioração mais acentuada das sementes no teste de envelhecimento acelerado tradicional em relação à utilização de solução saturada de NaCl, que possibilita a formação de ambiente com umidade relativa do ar próximo de 76% e maior uniformização do teor de água entre as sementes. Segundo Marcos-Filho (2015) as vantagens da utilização da solução saturada de NaCl é assegurar um teor de água mais uniforme entre as sementes, além de maior controle de microrganismos durante a execução do teste.

No teste de envelhecimento acelerado tradicional foram observados menores porcentagens de plântulas normais em comparação ao teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl para ambos os cultivares (Tabela 12). Os parâmetros obtidos pela análise Vigor-S após o envelhecimento acelerado tradicional também revelaram valores menores em comparação com a análise Vigor-S após o envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl (Tabela 14 e 15). Para o cultivar B, o teste de

envelhecimento acelerado tradicional e a análise Vigor-S após o envelhecimento acelerado tradicional apresentaram melhor sensibilidade para separar os lotes com maior semelhança no potencial fisiológico. Esses resultados também foram observados na primeira época experimental.

Quanto ao comprimento médio de plântulas, comprimento de raiz e comprimento de hipocótilo obtidos na análise Vigor-S comparados com a análise Vigor-S após o envelhecimento acelerado tradicional, observou-se redução acentuada após análise com o envelhecimento acelerado, conforme observado na Figura 1. As sementes de menor qualidade apresentam deterioração mais rápida do que as sementes que têm maior vigor (Torres e Marcos Filho, 2001). Assim, o sistema Vigor-S é uma importante ferramenta que possibilita complementar as informações obtidas pelo teste de envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl, possibilitando a determinação do comprimento das plântulas e de suas partes em relação à contagem de plântulas normais realizadas de modo convencional, e ainda, a vantagem de reduzir em um dia o período de avaliação.

Em relação ao índice de uniformidade de desenvolvimento das análises Vigor-S tradicional e Vigor-S após envelhecimento acelerado, os lotes com maiores índices foram os lotes de maior vigor (A1, A2 e A2) e, na análise Vigor-S após envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, os lotes A1, A2, A3, A4 e A6 apresentaram maiores valores apresentando variação na classificação dos lotes. Em relação ao cultivar B, na análise Vigor-S após envelhecimento acelerado tradicional, o lote B9 apresentou menor valor, e essa classificação foi semelhante à observada nos testes de vigor convencionalmente utilizados (Tabela12).

O índice de uniformidade de desenvolvimento nas análises Vigor-S e Vigor-S após envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl permitiram o mesmo ranqueamento dos lotes do cultivar A em comparação aos testes de emergência de plântulas em campo e índice de velocidade de emergência, ou seja, os lotes de maior vigor foram classificados com maiores índices de uniformidade. Rego (2021) encontrou informações consistentes dos dados dos índices de uniformidade, os quais permitiram estratificar os lotes de sementes de feijão-caupi em diferentes níveis de vigor. De acordo com Marcos-Filho *et al*. (2009), o índice de uniformidade é relevante para a avaliação do vigor de sementes, a emergência irregular gera atrasos da implantação do estande da lavoura, influenciando no crescimento e rendimento das culturas.

4.1.2. Avaliação da protrusão da raiz primária

Os resultados da porcentagem de plântulas com protrusão da raiz primária obtidos na avaliação visual (comprimento ≥ 1 mm) encontram-se na Tabela 16. Em relação ao cultivar A, na condição a 20 °C / 30h, os lotes A1, A3 e A5 apresentaram desempenho superior em relação aos demais lotes; no tratamento 20 °C / 48h, os lotes A1, A2, A3 e A9 apresentaram desempenho superior em relação aos demais lotes. Já no tratamento de 25 °C / 24h os lotes A1, A2 e A3 evidenciaram desempenho superior em relação ao restante dos lotes. No tratamento de 25 °C / 30h, os lotes A1, A2, A3, A6 e A9 apresentaram maiores porcentagens de protrusão da raiz primária em relação aos demais lotes e no

tratamento de 30 °C / 30h os lotes A1, A2, A3 e A6 apresentaram desempenho superior em relação aos demais lotes. Para o cultivar B, somente no tratamento 25 °C / 24h ocorreram diferenças significativas entre os lotes, sendo os lotes B1 e B6 com melhor desempenho e os lotes B9 e B10 com pior desempenho.

Os tratamentos 20 °C / 48h, 25 °C / 30h, 30 °C / 24h e 30 °C / 30h apresentaram maiores porcentagens de protrusão da raiz primária para ambos os cultivares. Entretanto, nos mesmos tratamentos não foram observadas diferenças significativas entre os lotes do cultivar B. No tratamento 30 °C / 30h também não foram observadas diferenças significativas entre os lotes dos dois cultivares. Esses resultados podem estar relacionados com a aceleração do metabolismo e protrusão da raiz primária no tratamento de maior temperatura e tempo de exposição, não permitindo discriminar os lotes, pois o critério utilizado nas avaliações considerou a contabilização das plântulas cujas raízes apresentavam comprimento superior a 1 mm, sem levar em consideração a determinação do comprimento da raiz.

Tabela 16. Porcentagem de plântulas com protrusão da raiz primária (P.R.P.) obtidas na avaliação visual após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na segunda época de avaliação.

	% P.R.P. [1]					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	6 A	94 A	49 A	88 A	81 A	85 A
A2	0 B	93 A	48 A	79 A	74 A	84 A
A3	9 A	96 A	41 A	80 A	77 A	85 A
A4	0 B	75 B	26 B	57 B	54 B	76 A
A5	4 A	76 B	24 B	69 B	64 B	83 A
A6	0 B	71 B	29 B	76 A	79 A	82 A
A7	1 B	75 B	16 B	66 B	61 B	81 A
A8	1 B	66 B	25 B	72 B	45 B	72 A
A9	1 B	86 A	20 B	82 A	63 B	80 A
Média	162,8	81,3	30,9	74,3	66,4	81,1
CV (%)	2,4	11,3	39,6	13,2	21,0	10,3
			Cultivar B			
B1	46 A	94 A	76 A	97 A	81 A	89 A
B2	34 A	94 A	64 B	86 A	89 A	93 A
B3	33 A	97 A	57 B	87 A	86 A	83 A
B4	41 A	95 A	68 B	88 A	88 A	94 A
B5	34 A	97 A	68 B	94 A	94 A	90 A
B6	50 A	95 A	80 A	85 A	91 A	96 A
B7	25 A	96 A	67 B	82 A	84 A	92 A
B8	39 A	93 A	56 B	84 A	83 A	91 A
B9	39 A	98 A	35 C	87 A	83 A	90 A
B10	29 A	95 A	37 C	80 A	89 A	87 A
Média	37,0	95,4	60,8	87,0	86,7	90,5
CV (%)	34,24	5,2	17,6	9,7	11,1	6,4

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [1] Dados transformados em arc sen $(x/100)^{1/2}$.

As Tabelas 17 a 22 mostram os resultados obtidos pelo *software* ImageJ referentes às alterações nos parâmetros morfológicos de perímetro, área, circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity*, visando a caracterização da protrusão da raiz primária.

Com relação ao perímetro das sementes do cultivar A, no tratamento 20 °C / 30h os lotes A5, A8 e A9 apresentaram maiores valores em relação ao lote A3. No tratamento a 20 °C / 48h os lotes A1, A2, A3, A5 e A9 evidenciaram maiores valores em relação aos demais lotes. Na condição a 25 °C / 24h os lotes A1, A5 e A8 apresentaram melhor desempenho e os lotes A3, A4, A6, A7 apresentaram desempenho inferior. No tratamento 25 °C / 30h, o lote A1 apresentou melhor desempenho e os lotes A4, A6 e A7 apresentaram desempenho inferior. Na condição de germinação a 30 °C / 24h o lote A1

apresentou maior valor e os lotes A3, A4 e A7 apresentaram menores valores. No tratamento 30 °C / 30h os lotes A1, A2 e A4 apresentaram maiores valores e os lotes A6, A7 e A8 evidenciaram menores valores.

Para o cultivar B, nas condições de germinação a 20 °C / 30h o lote B2 e B6 apresentaram maiores valores de perímetro e o lote B5 o menor valor. No tratamento 20 °C / 48h, os lotes B1, B4 e B10 apresentaram maiores valores e os lotes B3, B5 e B9 apresentaram valores inferiores. No tratamento a 25 °C / 24h o lote B2 evidenciou maior valor em relação ao lote B5 que apresentou menor valor dentre os lotes. No tratamento a 25 °C / 30h os lotes B1, B2 e B4 apresentaram maiores valores em relação aos demais lotes. Nas condições a 30 °C / 24h e 30 °C / 30h a discriminação dos lotes foi semelhante, com os lotes B2, B4, B6 e B10 apresentando maiores valores de perímetro em relação aos demais lotes.

Considerando os resultados dos dois cultivares, a avaliação de alterações do perímetro das sementes não permitiu a separação dos lotes quanto ao vigor de maneira semelhante à avaliação da protrusão da raiz primária (Tabela 16) e aos demais testes utilizados para avaliação do vigor de sementes de soja (Tabela 12), em nenhum dos tratamentos de temperatura e tempo de germinação. No geral, para o cultivar A, os lotes A1 e A7 apresentaram maior e menor valor de perímetro, respectivamente. Para o cultivar B, o lote B2 apresentou maior e o lote B5 menor valor nos tratamentos analisados. Os resultados de perímetro da segunda época estão condizentes com os resultados discutidos na primeira época experimental.

Com relação à avaliação de alterações na área das sementes do cultivar A, nas condições a 20 °C / 30h e 30 °C / 24h os lotes A1, A5, A8 e A9 apresentaram maiores valores e o lote A3 evidenciou menor valor. Nas condições a 20 °C / 48h e 30 °C / 30h os lotes A1, A5, A8 e A9 apresentaram melhor desempenho e os lotes A3, A4, A6 e A7 apresentaram desempenho inferior. No tratamento a 25 °C / 24h os lotes A5 e A8 evidenciaram maiores valores em comparação com o lote A3 que apresentou menor valor. No tratamento 25 °C / 30h, os lotes A1, A5, A8 e A9 apresentaram desempenho superior em relação aos demais lotes (Tabela 18).

Em relação ao cultivar B, nas condições a 20 °C / 30h, 25 °C / 24h, 25 °C / 30h, 30 °C / 24h e 30 °C / 30h houve discriminação semelhante dos lotes, com o lote B2 apresentando maior valor e o lote B5 menor valor. No tratamento 20 °C / 48h, os lotes B1, B2, B4, B7, B8 e B10 apresentaram maiores valores e o lote B5 menor valor.

Considerando os resultados de área das sementes obtidos nos diferentes tratamentos de temperatura e período de germinação observou-se maior e menor valor para os lotes A3 e A5, respectivamente. Para o cultivar B, os lotes B2 e B5 apresentaram maiores valores e menores, respectivamente. A separação dos lotes com base na área das sementes correspondeu aos resultados de perímetro (Tabela 17) e, consequentemente, sem apresentar a mesma separação obtida nas avaliações de protrusão da raiz primária e demais testes de vigor (Tabelas 12, 13 e 16). Esses resultados estão condizentes com os resultados obtidos na primeira época, em que também não foi observada

consistência das informações de perímetro e área para separação dos lotes conforme os resultados dos testes tradicionais para avaliação do vigor.

Por exemplo, as sementes dos lotes B2 e B5 que apresentaram os menores e maiores valores de perímetro e área, respectivamente. Porém, os testes de condutividade elétrica, viabilidade e vigor avaliado pelo teste de tetrazólio (Tabela 12) mostraram superioridade do lote B2. Os menores valores de condutividade elétrica das sementes do lote B2 indicam melhor organização das membranas das células e organelas, refletindo em maior controle de água durante a embebição, apresentando menor volume e, consequentemente, menor perímetro e área. Por outro lado, comparando os resultados de perímetro e área com a porcentagem de plântulas com protrusão da raiz primária (Tabela 16), todos os tratamentos avaliados apresentaram porcentagens semelhantes para os lotes B2 e B5, não diferindo estatisticamente entre si.

Uma explicação para a inconsistência das informações de perímetro e área das sementes deve-se às variações na taxa de embebição das sementes como consequência do grau de deterioração da semente. Assim, mesmo que não ocorra protrusão da raiz primária, sementes mais deterioradas absorvem água mais rapidamente e tendem a apresentar maior perímetro e área em comparação a sementes integras e mais vigorosas. Outro fator que pode ter interferido na consistência dos resultados desses dois parâmetros é o posicionamento das sementes durante a captura das imagens. Quando embebida, a semente de soja apresenta diferenças mais acentuadas nas suas dimensões de largura e espessura. Consequentemente, possíveis alterações na acomodação das sementes sobre o papel de germinação durante a aquisição das imagens pode resultar em variabilidade dos resultados.

Alterações morfológicas das sementes durante a embebição têm sido investigadas para tentar identificar sementes germináveis antes da protrusão da raiz primária (Matthews e Powell, 2012). Entretanto, no presente trabalho o perímetro e a área das sementes não constituíram em parâmetros seguros para identificar a protrusão da raiz primária e sua associação com o vigor das sementes de soja.

Tabela 17. Resultados de perímetro de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na segunda época de avaliação.

	Perímetro (mm)[2]					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	34,36 B	42,77 A	36,67 A	42,07 A	40,98 A	44,65 A
A2	32,71 C	42,28 A	34,92 B	39,06 B	38,04 B	44,24 A
A3	31,06 D	40,33 A	33,06 C	38,54 B	36,28 C	40,73 B
A4	32,59 C	35,66 B	33,51 C	35,22 C	34,96 C	36,62 A
A5	35,27 A	38,98 A	36,62 A	38,21 B	37,82 B	40,90 B
A6	32,86 C	36,50 B	33,80 C	35,89 C	35,93 B	37,83 C
A7	32,63 C	35,17 B	33,71 C	35,37 C	34,60 C	37,14 C
A8	35,05 A	37,44 B	36,41 A	38,52 B	37,37 B	38,40 C
A9	35,08 A	39,45 A	35,49 B	38,23 B	37,56 B	40,13 B
Média	33,51	38,73	34,91	37,90	37,06	40,07
CV (%)	1,52	3,37	2,39	3,12	3,74	3,65
			Cultivar B			
B1	36,19 B	55,44 A	39,15 B	46,66 A	42,25 B	51,53 B
B2	38,11 A	53,91 B	40,66 A	45,80 A	46,01 A	53,37 A
B3	36,20 B	48,85 C	37,61 C	43,19 B	42,03 B	46,79 B
B4	36,55 B	57,96 A	39,16 B	46,72 A	45,51 A	56,74 A
B5	34,09 C	49,09 C	35,91 D	42,72 B	43,78 B	49,67 B
B6	37,33 A	52,81 B	39,41 B	44,62 B	46,32 A	54,35 A
B7	36,26 B	52,46 B	37,59 C	43,21 B	42,90 B	50,61 B
B8	36,31 B	52,88 B	37,93 C	42,78 B	43,06 B	50,72 B
B9	36,92 B	47,51 C	36,91 C	44,12 B	42,84 B	49,30 B
B10	36,23 B	55,93 A	37,02 C	43,00 B	45,41 A	53,94 A
Média	36,42	52,68	38,13	44,28	44,01	51,70
CV (%)	1,89	5,65	2,42	4,56	4,43	5,44

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [1] Dados transformados em arc sen $(x/100)^{1/2}$, [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Tabela 18. Resultados de área de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na segunda época de avaliação.

	Área (mm²)[2]					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
1	79,89 A	88,36 A	84,41 B	89,90 A	89,03 A	88,53 A
2	72,51 B	83,08 B	76,39 C	81,56 B	80,33 B	83,88 B
3	65,22 C	75,97 C	70,78 D	77,10 B	73,01 D	76,03 C
4	71,62 B	77,28 C	74,75 C	77,47 B	77,18 C	76,11 C
5	83,03 A	89,53 A	88,40 A	88,97 A	89,72 A	91,53 A
6	72,56 B	79,20 C	74,97 C	77,59 B	79,23 B	79,48 C
7	71,73 B	75,61 C	75,67 C	77,48 B	76,18 C	77,35 C
8	82,31 A	86,32 B	87,44 A	89,35 A	88,53 A	85,57 B
9	82,77 A	90,96 A	83,60 B	87,15 A	87,90 A	91,47 A
Média	75,74	82,92	79,60	82,95	82,35	83,33
CV (%)	2,83	3,90	3,46	3,72	3,35	4,10
			Cultivar B			
1	84,18 B	100,35 A	90,69 B	91,55 B	91,02 B	95,75 B
2	95,91 A	108,84 A	101,47 A	102,55 A	104,07 A	111,53 A
3	86,30 B	94,95 B	86,97 B	91,71 B	90,45 B	92,26 C
4	87,09 B	102,85 A	90,23 B	93,51 B	93,99 B	100,25 B
5	75,80 C	87,40 C	76,68 C	83,68 C	83,84 C	86,65 D
6	87,02 B	95,70 B	89,37 B	90,14 B	96,11 B	99,54 B
7	85,85 B	99,02 A	86,97 B	92,65 B	93,38 B	97,29 B
8	84,95 B	103,37 A	89,63 B	89,79 B	94,24 B	100,30 B
9	87,63 B	96,76 B	87,36 B	93,57 B	95,06 B	98,51 B
10	85,32 B	101,43 A	86,04 B	90,75 B	94,02 B	99,53 B
Média	86,00	99,07	88,54	91,99	93,62	98,16
CV (%)	3,09	5,16	3,64	3,39	3,51	3,23

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Com relação à circularidade, os tratamentos 20 °C / 48h, 25 °C / 30h, 30 °C / 24h e 30 °C / 30h, possibilitaram a mesma diferenciação dos lotes do cultivar A, com menores valores de circularidade dos lotes A1, A2 e A3 em relação aos demais lotes. Na condição de germinação a 25 °C / 24h os lotes A1 e A2 evidenciaram menores valores em relação ao restante dos lotes. Na condição a 20 °C / 30h os lotes A5, A6, A8 e A9 apresentaram maiores valores em relação aos demais lotes (Tabela 19).

Em relação ao cultivar B, os tratamentos 25 °C / 24h e 25 °C / 30h apresentaram a mesma separação entre os lotes, com os lotes B1, B4, B5 e B6 apresentando menores valores de circularidade em relação aos demais lotes. Na condição a 20 °C / 30h, o lote B6 apresentou maior valor e os lotes B2, B3, B4, B5, B7 e B10 apresentaram menores valores. No tratamento 20 °C / 48h os lotes B1, B4, B6 e

B10 evidenciaram menores valores e o lote B9 maior valor. No tratamento 30 °C / 24h os lotes B4, B5, B6 e B10 apresentaram melhor desempenho em relação aos demais lotes. Em 30 °C / 30h, os lotes B1, B4, B5, B6 e B10 apresentaram desempenho superior em relação aos demais lotes.

Dessa forma, com base nos resultados de circularidade, os lotes A1, A2 e A3, do cultivar A, apresentaram melhor desempenho em relação aos demais lotes, pois tiveram menores valores de circularidade que foram associados com a maior porcentagem de protrusão da raiz primária. Para o cultivar B, o lote B6 apresentou melhor desempenho (menor valor de circularidade) em relação aos lotes B2, B3 e B7 para todos os tratamentos, com exceção do tratamento 20 °C / 30h.

Para o cultivar A, os tratamentos 20 °C / 48h, 25 °C / 30h, 30 °C / 24h e 30 °C / 30h apresentaram a mesma discriminação dos lotes observada nos testes de vigor tradicional e análise Vigor-S (Tabela 12 e 13), análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional, exceto no comprimento de raiz, Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl (Tabela 14), no tratamento 25 °C / 24h da porcentagem da protrusão da raiz primária determinada a partir da análise visual (Tabela 16). Para o cultivar B, os lotes apresentaram a mesma classificação que o teste de condutividade elétrica, vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio, comprimento de hipocótilo pela análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl e no tratamento 25 °C / 24h da porcentagem da protrusão da raiz primária determinada a partir da análise visual apresentaram semelhança na classificação dos lotes (Tabela 15).

O parâmetro circularidade, como descritor de variação de forma de semente, foi usado para estabelecer o início da protrusão da raiz primária em sementes de repolho, lentilha, pimenta e tomate (Dell'Aquila, 2004a). No presente estudo com sementes de soja a circularidade também foi eficiente para caracterizar a protrusão da raiz primária em ambos os cultivares.

Tabela 19. Resultados de circularidade de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na segunda época de avaliação.

	Circularidade[2]					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	0,85 B	0,63 A	0,79 A	0,65 A	0,68 A	0,60 A
A2	0,85 B	0,61 A	0,79 A	0,69 A	0,72 A	0,58 A
A3	0,85 B	0,61 A	0,81 B	0,68 A	0,71 A	0,61 A
A4	0,85 B	0,76 B	0,83 B	0,78 B	0,79 B	0,72 B
A5	0,83 A	0,74 B	0,82 B	0,77 B	0,79 B	0,69 B
A6	0,84 A	0,75 B	0,82 B	0,76 B	0,77 B	0,70 B
A7	0,85 B	0,77 B	0,83 B	0,78 B	0,80 B	0,71 B
A8	0,84 A	0,77 B	0,82 B	0,76 B	0,80 B	0,74 B
A9	0,84 A	0,74 B	0,83 B	0,75 B	0,78 B	0,72 B
Média	0,84	0,71	0,82	0,73	0,76	0,67
CV (%)	0,70	4,18	2,12	3,45	3,99	4,23
			Cultivar B			
B1	0,81 B	0,43 A	0,75 A	0,55 A	0,66 B	0,50 A
B2	0,83 C	0,49 B	0,77 B	0,64 B	0,63 B	0,53 B
B3	0,83 C	0,51 B	0,77 B	0,64 B	0,66 B	0,56 B
B4	0,82 C	0,42 A	0,75 A	0,57 A	0,60 A	0,44 A
B5	0,82 C	0,48 B	0,75 A	0,59 A	0,56 A	0,49 A
B6	0,79 A	0,46 A	0,73 A	0,60 A	0,59 A	0,47 A
B7	0,82 C	0,48 B	0,77 B	0,64 B	0,65 B	0,52 B
B8	0,81 B	0,49 B	0,78 B	0,63 B	0,66 B	0,52 B
B9	0,81 B	0,55 C	0,80 B	0,62 B	0,67 B	0,55 B
B10	0,82 C	0,44 A	0,79 B	0,64 B	0,59 A	0,48 A
Média	0,81	0,48	0,77	0,61	0,63	0,50
CV (%)	1,44	8,52	2,27	6,63	6,39	7,83

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Assim como observado na primeira época experimental, o parâmetro *roundness* proporcionou a mesma separação dos lotes obtida pelo *aspect ratio* para ambos os cultivares, exceto no tratamento 30 °C / 30h do cultivar A.

Quanto aos resultados de *aspect ratio* e *roundness* nas condições de germinação a 20 °C / 30h, 20 °C / 48h, 25 °C / 24h, 25 °C / 30h e 30 °C / 24h os lotes A1, A2 e A3 foram separados com desempenho superior em relação aos demais lotes, ou seja, menores e maiores valores de *aspect ratio* e *roundness*, respectivamente. Já no tratamento 30 °C / 30h os lotes A2, A3 e A6 apresentaram melhor desempenho em relação aos demais lotes apenas para o *aspect ratio*. No parâmetro *roundness* o lote A3 apresentou melhor desempenho em relação aos lotes A4, A5, A7, A8 e A9 (Tabelas 20 e 21).

Em relação ao cultivar B, não houve diferenças significativas no tratamento 20 °C / 30h para os parâmetros de *aspect ratio* e *roundness*. Na condição a 20 °C / 48h, os lotes B2, B3 e B9 apresentaram menores e maiores valores de *aspect ratio* e *roundness*, respectivamente, os lotes B1, B4 e B10 apresentaram maiores valores de *aspect ratio* e menores valores de *roundness*. No tratamento 25 °C / 24h os lotes B1, B2, B4, B5 e B6 evidenciaram menores e maiores valores de *aspect ratio* e *roundness*, respectivamente, os lotes B8, B9 e B10 apresentaram maiores e menores valores de *aspect ratio* e *roundness*, respectivamente. Na condição a 25 °C / 30h, os lotes B1 e B5 apresentaram menores e maiores valores de *aspect ratio* e *roundness*, respectivamente, em relação aos demais lotes. No tratamento 30 °C / 24h os lotes B2, B3, B4, B5, B6 e B10 evidenciaram menores e maiores valores de *aspect ratio* e *roundness*, respectivamente, em relação ao restante dos lotes. O tratamento 30 °C / 30h, os lotes B2, B3, B8 e B9 apresentaram maior desempenho em relação aos demais lotes, ou seja, menores valores de *aspect ratio* e maiores valores de *roundness*.

De acordo com os resultados obtidos do cultivar A, em ambos os parâmetros os tratamentos 20 °C / 30h, 20 °C / 48h, 25 °C / 24h, 25 °C / 30h e 30 °C / 24h permitiram separação dos lotes de maneira semelhante aos testes tradicionais de vigor (Tabela 12), na análise Vigor-S (Tabela 13), Vigor-S após o envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl e Vigor-S após o envelhecimento acelerado tradicional exceto o comprimento de raiz (Tabela 14) e porcentagem da protrusão de raiz primária avaliada no tratamento 25 °C / 24h (Tabela 16), e no parâmetro circularidade para os tratamentos 20 °C / 48h, 25 °C / 30h, 30 °C / 24h e 30 °C / 30h (Tabela 19).

Quanto ao cultivar B, foi evidenciada semelhança na discriminação dos lotes com base no *aspect ratio* e *roundness* em relação aos testes de envelhecimento acelerado tradicional, condutividade elétrica, viabilidade avaliada pelo teste de tetrazólio, análise Vigor-S para o comprimento de hipocótilo (Tabela 13), no tratamento 25 °C / 24h da porcentagem da protrusão de raiz primária e em todos os tratamentos avaliados pela circularidade.

Tabela 20. Resultados de relação de aspecto (*aspect ratio* - AR) de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na segunda época de avaliação.

	AR[2]					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	1,47 A	1,34 A	1,41 A	1,30 A	1,34 A	1,38 B
A2	1,50 A	1,31 A	1,41 A	1,33 A	1,36 A	1,37 A
A3	1,47 A	1,32 A	1,43 A	1,33 A	1,34 A	1,33 A
A4	1,52 B	1,43 B	1,49 B	1,44 B	1,44 B	1,40 B
A5	1,55 B	1,40 B	1,51 B	1,45 B	1,43 B	1,40 B
A6	1,54 B	1,43 B	1,49 B	1,41 B	1,40 B	1,36 A
A7	1,52 B	1,42 B	1,48 B	1,45 B	1,46 B	1,39 B
A8	1,54 B	1,44 B	1,52 B	1,42 B	1,45 B	1,41 B
A9	1,53 B	1,42 B	1,53 B	1,46 B	1,46 B	1,40 B
Média	1,52	1,39	1,47	1,40	1,41	1,38
CV (%)	1,81	2,87	2,65	3,01	2,54	2,38
			Cultivar B			
B1	1,51 A	1,49 C	1,43 A	1,30 A	1,35 B	1,46 B
B2	1,50 A	1,31 A	1,42 A	1,33 B	1,32 A	1,36 A
B3	1,50 A	1,29 A	1,46 B	1,34 B	1,32 A	1,35 A
B4	1,50 A	1,57 C	1,43 A	1,32 B	1,33 A	1,55 B
B5	1,51 A	1,36 B	1,43 A	1,28 A	1,31 A	1,45 B
B6	1,47 A	1,41 B	1,40 A	1,34 B	1,32 A	1,48 B
B7	1,52 A	1,41 B	1,46 B	1,35 B	1,37 B	1,46 B
B8	1,51 A	1,37 B	1,49 C	1,34 B	1,36 B	1,39 A
B9	1,51 A	1,31 A	1,51 C	1,32 B	1,38 B	1,36 A
B10	1,52 A	1,51 C	1,50 C	1,34 B	1,32 A	1,50 B
Média	1,51	1,40	1,45	1,33	1,34	1,43
CV (%)	1,98	4,20	1,78	2,28	2,98	4,82

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Tabela 21. Resultados de redondeza (*roundness*) de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na segunda época de avaliação.

	***Roundness*[2]**					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	0,68 A	0,75 A	0,71 A	0,77 A	0,74 A	0,74 B
A2	0,67 A	0,77 A	0,71 A	0,76 A	0,74 A	0,74 B
A3	0,68 A	0,76 A	0,70 A	0,76 A	0,75 A	0,76 A
A4	0,66 B	0,70 B	0,67 B	0,69 B	0,69 B	0,72 C
A5	0,64 B	0,71 B	0,66 B	0,69 B	0,70 B	0,71 C
A6	0,65 B	0,70 B	0,67 B	0,71 B	0,71 B	0,73 B
A7	0,66 B	0,70 B	0,67 B	0,69 B	0,68 B	0,72 C
A8	0,65 B	0,69 B	0,65 B	0,70 B	0,69 B	0,71 C
A9	0,65 B	0,70 B	0,65 B	0,69 B	0,68 B	0,72 C
Média	0,66	0,72	0,68	0,72	0,71	0,73
CV (%)	1,87	2,62	2,73	3,13	2,51	2,23
			Cultivar B			
B1	0,66 A	0,69 C	0,70 A	0,77 A	0,74 B	0,70 B
B2	0,67 A	0,77 A	0,70 A	0,75 B	0,76 A	0,75 A
B3	0,67 A	0,78 A	0,69 B	0,75 B	0,76 A	0,75 A
B4	0,67 A	0,67 C	0,70 A	0,76 B	0,76 A	0,68 B
B5	0,67 A	0,75 B	0,70 A	0,78 A	0,77 A	0,72 B
B6	0,68 A	0,73 B	0,71 A	0,75 B	0,76 A	0,70 B
B7	0,66 A	0,72 B	0,68 B	0,74 B	0,73 B	0,71 B
B8	0,66 A	0,74 B	0,67 C	0,75 B	0,74 B	0,73 A
B9	0,66 A	0,77 A	0,66 C	0,76 B	0,73 B	0,74 A
B10	0,66 A	0,68 C	0,67 C	0,75 B	0,76 A	0,69 B
Média	0,66	0,73	0,69	0,76	0,75	0,72
CV (%)	1,97	3,51	1,83	2,27	2,92	4,26

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Com relação ao *solidity*, nos tratamentos 20 °C / 48h, 25 °C / 24h, 25 °C / 30h, 30 °C / 24h e 30 °C / 30h os lotes A1, A2 e A3 apresentaram melhor desempenho em relação aos demais lotes do cultivar A, ou seja, apresentaram menores valores. Na condição de germinação a 20 °C / 30h o lote A3 apresentou menor valor de *solidity* em comparação com os demais lotes (Tabela 22).

Quanto ao cultivar B, o tratamento 20 °C / 30h o lote B6 evidenciou melhor desempenho em relação aos demais lotes. Na condição a 20 °C / 48h, os lotes B1, B4, B6 e B10 apresentaram menores valores e o lote B9 maior valor. Para o tratamento 25 °C / 24h, os lotes B1, B4 e B6 apresentaram menores valores e os lotes B9 e B10 os maiores valores. Na condição a 25 °C / 30h, os lotes B1, B4 e B5 apresentaram desempenho superior em relação aos demais lotes. No tratamento 30 °C / 30h, o lote

B4 apresentou melhor desempenho e os lotes B1, B2, B3, B7, B8 e B9 apresentaram desempenho inferior.

Para cultivar A, com base no parâmetro *solidity* os tratamentos 20 °C / 48h, 25 °C / 24h, 25 °C / 30h, 30 °C / 24h e 30 °C / 30h permitiram separação dos lotes de maneira semelhante aos testes de vigor tradicionais (Tabela 12), análises Vigor-S (Tabela 13), análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl e análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional exceto o comprimento de raiz (Tabela 14), porcentagem da protrusão de raiz primária avaliada no tratamento 25 °C / 24h (Tabela 16) e no parâmetro circularidade para os tratamentos 20 °C / 48h, 25 °C / 30h, 30 °C / 24h e 30 °C / 30h (Tabela 19) e nos tratamentos 20 °C / 30h, 20 °C / 48h, 25 °C / 24h, 25 °C / 30h e 30 °C / 24h do *aspect ratio* e *roundness*.

Em relação ao cultivar B, os lotes B6 e B9 apresentaram melhor e pior desempenho, respectivamente. Esse ranqueamento foi semelhante a classificação dos lotes nos testes de envelhecimento acelerado tradicional, análises Vigor-S, Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl com exceção do comprimento de raiz (Tabela 15), no tratamento 25 °C / 24h da porcentagem de protrusão da raiz primária, em todos os tratamentos avaliados pela circularidade e nos tratamentos 25 °C / 24h e 30 °C / 24h dos parâmetros *aspect ratio* e *roundness*.

Tabela 22. Resultados de solidez (*solidity*) de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na segunda época de avaliação.

	***Solidity*[2]**					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	0,97 B	0,86 A	0,93 A	0,87 A	0,89 A	0,83 A
A2	0,97 B	0,85 A	0,93 A	0,88 A	0,90 A	0,82 A
A3	0,96 A	0,84 A	0,94 A	0,87 A	0,89 A	0,84 A
A4	0,97 B	0,92 B	0,95 B	0,93 B	0,93 B	0,90 B
A5	0,97 B	0,90 B	0,95 B	0,93 B	0,93 B	0,89 B
A6	0,97 B	0,91 B	0,95 B	0,92 B	0,92 B	0,90 B
A7	0,97 B	0,92 B	0,95 B	0,93 B	0,94 B	0,90 B
A8	0,97 B	0,93 B	0,95 B	0,92 B	0,94 B	0,91 B
A9	0,97 B	0,91 B	0,96 B	0,92 B	0,93 B	0,90 B
Média	0,97	0,90	0,95	0,91	0,92	0,88
CV (%)	0,22	1,82	0,90	1,58	1,72	1,55
			Cultivar B			
B1	0,95 B	0,74 A	0,91 A	0,81 A	0,88 B	0,78 C
B2	0,96 B	0,78 B	0,93 B	0,86 B	0,87 B	0,80 C
B3	0,95 B	0,79 B	0,93 B	0,86 B	0,87 B	0,82 C
B4	0,95 B	0,72 A	0,92 A	0,82 A	0,84 A	0,73 A
B5	0,95 B	0,77 B	0,92 A	0,84 A	0,83 A	0,77 B
B6	0,93 A	0,75 A	0,91 A	0,85 B	0,84 A	0,76 B
B7	0,95 B	0,77 B	0,93 B	0,86 B	0,88 B	0,80 C
B8	0,95 B	0,78 B	0,93 B	0,87 B	0,88 B	0,80 C
B9	0,95 B	0,82 C	0,95 C	0,85 B	0,88 B	0,81 C
B10	0,95 B	0,74 A	0,94 C	0,86 B	0,84 A	0,77 B
Média	0,95	0,77	0,93	0,85	0,86	0,79
CV (%)	0,60	3,56	0,95	2,71	2,48	3,29

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

De maneira geral foi possível discriminar os lotes A1, A2 e A3 que apresentaram melhor desempenho em relação aos demais lotes, do cultivar A, pelos parâmetros morfológicos circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity*. Assim, os tratamentos 20 °C / 48h, 25 °C / 30h, 30 °C / 24h apresentaram maior eficiência para caracterização da protrusão da raiz primária. Essa separação dos lotes também foi confirmada no tratamento 25 °C / 24h da porcentagem da protrusão da raiz primária determinada a partir da análise visual (Tabela 16). O atraso no tempo de germinação pode ser identificado como a necessidade de maior tempo para reparo metabólico em sementes deterioradas antes que o processo de germinação se inicie (Matthews et al., 2011).

Em relação ao cultivar B, os parâmetros circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity* apresentaram eficiência na caracterização da protrusão da raiz primária, os tratamentos com temperaturas e tempos que apresentaram melhor desempenho para o ranqueamento dos lotes foram 25 °C / 24h e 30 °C / 24h, a classificação dos lotes também foi confirmada pelo tratamento 25 °C / 24h da porcentagem de protrusão da raiz primária.

Dessa forma, o *software* ImageJ apresentou eficiência para identificar a protrusão da raiz primária, visto que houve a confirmação do ranqueamento dos lotes com os testes de vigor tradicionais, e os parâmetros circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity* apresentaram maior segurança para identificar a protrusão da raiz primária com base nos aspectos morfológicos da semente. A precocidade da protrusão da raiz primária como teste de vigor pode ser utilizada usando a aplicação da contagem automatizada sem necessidade de determinar o tempo completo de germinação (Matthews e Powell, 2012).

4.3. Terceira época de avaliação

4.3.1. Avaliação do potencial fisiológico das sementes

Na Tabela 23 estão apresentados os resultados do teor de água inicial, teor de água após os testes de envelhecimento acelerado e do potencial fisiológico das sementes dos dois cultivares. O teor de água inicial das sementes variou de 5,6% a 6,0% e 5,6% a 6,2%; após o envelhecimento acelerado tradicional as porcentagens foram de 22,5% a 24,2% e 21,5% a 23,7%, o teor de água após o envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl apresentaram variações de 12,1% a 12,6% e 11,6% a 12,4%, para o cultivar A e B, respectivamente. Diferentemente da primeira e segunda época de avaliação, a variação do teor de água ficou dentro dos limites tolerados de 4 pontos percentuais para assegurar confiabilidade dos resultados dos testes.

Tabela 23. Teores de água inicial, após o envelhecimento acelerado tradicional (T.A. EAT 48h) e após o envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl (T.A. EASS 72h), germinação (G), primeira contagem de germinação (PCG), envelhecimento acelerado tradicional (EAT 48h) e com solução saturada de NaCl (EASS 72h), condutividade elétrica, vigor (VIG) e viabilidade (VIAB) avaliados pelo teste de tetrazólio, emergência de plântulas em campo (EPC) e índice de velocidade de emergência (IVE), em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na terceira época de avaliação.

Lotes	TA.	TA. EAT	TA. EASS	G[1]	PCG[1]	EAT[1]	EASS[1]	CE[2]	VIG[1]	VIAB[1]	ECP[1]	IVE[2]
		---------- % ----------						$\mu S.cm^{-1}.g^{-1}$	---------- % ----------			índice
						Cultivar A						
A1	5,9	22,8	12,1	96 A	96 A	84 A	96 A	92,13 B	95 A	98 A	89 A	10,88 A
A2	5,9	23,4	12,6	100 A	99 A	85 A	96 A	78,68 A	93 A	98 A	86 A	9,77 A
A3	6,0	23,3	12,5	98 A	98 A	84 A	95 A	80,28 A	94 A	97 A	88 A	9,72 A
A4	5,6	24,2	12,1	92 B	90 B	61 B	89 B	136,60 C	88 B	96 B	65 B	6,68 B
A5	5,9	23,3	12,3	92 B	92 B	60 B	87 B	133,89 C	84 C	94 B	58 B	5,38 B
A6	5,9	23,1	12,2	91 B	90 B	41 C	93 B	129,92 C	84 C	91 C	83 A	9,99 A
A7	5,6	23,8	12,2	93 B	93 B	47 C	91 B	144,21 C	80 C	90 C	72 B	6,60 B
A8	5,8	22,5	12,3	92 B	92 B	35 C	89 B	143,73 C	87 B	94 B	61 B	6,40 B
A9	6,0	22,8	12,2	93 B	93 B	40 C	93 B	130,10 C	83 C	91 C	86 A	8,48 A
Média	-	-	-	93,7	93,3	59,2	91,8	118,84	87,2	94,0	76	8,21
CV (%)	-	-	-	3,67	4,26	13,14	4,77	8,74	2,84	1,71	15,33	17,68
						Cultivar B						
B1	5,9	22,4	12,1	100 A	100 A	95 A	99 A	82,12 A	96 A	98 A	81 A	9,26 A
B2	6,2	21,7	11,9	99 A	99 A	94 A	100 A	79,97 A	93 B	97 B	95 A	10,56 A
B3	6,0	23,7	12,4	99 A	99 A	90 A	100 A	95,48 B	96 A	99 A	81 A	9,27 A
B4	5,7	22,6	11,6	97 B	97 B	96 A	96 B	83,39 A	92 B	95 B	79 A	9,15 A
B5	5,7	22,5	12,1	99 A	99 A	90 A	97 B	123,33 B	94 B	98 A	80 A	9,25 A
B6	5,9	22,1	12,3	94 C	94 C	95 A	97 B	95,33 B	96 A	98 A	86 A	9,75 A
B7	5,6	21,5	12,3	100 A	100 A	95 A	99 A	86,73 A	93 B	96 B	92 A	10,19 A
B8	5,6	22,5	11,8	99 A	99 A	93 A	100 A	91,99 B	93 B	96 B	89 A	10,66 A
B9	6,0	22,0	11,8	100 A	100 A	82 B	97 B	96,55 B	94 B	98 A	92 A	10,39 A
B10	6,0	22,4	12,1	97 B	97 B	91 A	93 C	89,20 B	82 C	91 C	94 A	10,45 A
Média	-	-	-	98,1	98,1	91,8	97,6	92,42	92,5	96,2	87	9,89
CV (%)	-	-	-	1,51	1,51	5,12	1,79	10,32	2,02	1,37	15,21	20,54

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [1]Dados transformados em arc sen $(x/100)^{1/2}$, [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

A partir dos resultados de avaliação do potencial fisiológico do cultivar A foram observadas diferenças estatísticas ($p \leq 0,05$) em todos os testes apresentados na Tabela 23. Os testes de germinação, primeira contagem de germinação e envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl evidenciaram a mesma separação dos lotes, sendo os lotes A1, A2 e A3 de melhor desempenho em relação aos demais lotes. No teste de envelhecimento acelerado tradicional, os lotes A1, A2 e A3 evidenciaram maiores valores e os lotes A6, A7, A8 e A9 apresentaram menores valores.

Em relação ao teste de condutividade elétrica, os lotes A2 e A3 apresentaram maior desempenho e os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 evidenciaram desempenho inferior. Quanto ao vigor avaliado pelo teste de tetrazólio, os lotes A1, A2 e A3 apresentaram maiores valores em relação aos lotes A4, A5, A6, A7 e A9. No teste de viabilidade avaliado pelo teste de tetrazólio os lotes A1, A2 e A3 apresentaram maiores valores em relação aos lotes A6, A7 e A9 que apresentaram menores valores. Com relação ao teste de emergência de plântulas em campo e o índice de velocidade de emergência que apresentaram a mesma separação dos lotes, os lotes A1, A2, A3, A6 e A9 evidenciaram maior vigor em relação aos demais lotes.

Todos os testes apresentados na Tabela 23 apresentaram semelhança na identificação dos lotes mais vigorosos do cultivar A. Nas épocas anteriores, os testes tradicionais de vigor também apresentaram a mesma classificação dos lotes de melhor desempenho.

Em relação ao teste de germinação e primeira contagem de germinação, ambos indicaram a mesma estratificação dos lotes. As maiores porcentagens de plântulas normais foram obtidas para os lotes B1, B2, B3, B5, B7, B8 e B9, ao passo que o lote B6 evidenciou menor porcentagem.

O teste de germinação e a primeira contagem de germinação nesta época experimental apresentaram variações nas discriminações dos lotes do cultivar B em comparação com as demais épocas experimentais, ou seja, observou-se diferenças na classificação do lote B6 que apresentou maiores porcentagens nas duas primeiras épocas e menores valores nesta terceira época.

Para o teste de condutividade elétrica, os lotes B1, B2, B4 e B7 apresentaram menores valores em relação aos demais lotes. No teste de vigor avaliado pelo teste de tetrazólio, os lotes B1, B3 e B6 apresentaram maiores valores e o lote B10 menor valor. Para o teste de viabilidade avaliado pelo teste de tetrazólio, os lotes B1, B3, B5, B6 e B9 apresentaram maiores valores e o lote B10 apresentou menor valor.

Para o cultivar B, a análise da variância dos dados revelaram diferenças significativas entre os lotes em todos os testes conduzidos, exceto na emergência de plântulas em campo e índice de velocidade de emergência. Foram observadas variações quanto à identificação do lote menos vigoroso. O lote B9 apresentou pior desempenho nos testes de envelhecimento acelerado tradicional e condutividade elétrica. Por outro lado, o lote B6 apresentou pior desempenho nos testes de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl e vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio. Entretanto, o lote B9 apresentou melhor desempenho no teste de viabilidade avaliado pelo teste de tetrazólio. Houve melhor sensibilidade de alguns testes para a identificação do lote menos vigoroso em comparação com as épocas anteriores.

Na terceira época experimental os testes de germinação, primeira contagem de germinação, envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl e viabilidade avaliada pelo teste de tetrazólio identificaram os lotes B1 e B10 como de melhor e pior desempenho, respectivamente. Diferentemente dos resultados da primeira e segunda época experimental, os lotes B6 e B9 apresentaram melhor e pior desempenho. Os resultados dos testes de emergência de plântulas em campo e o índice de

velocidade de emergência da segunda e terceira época experimental não foram observadas diferenças significativas entre os lotes.

O teste de envelhecimento acelerado tradicional apresentou a mesma estratificação nas três épocas experimentais. O lote B9 foi identificado como de menor vigor em relação aos demais lotes. No teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, os lotes B1, B2, B3, B7 e B8 apresentaram maiores porcentagens e o lote B10 apresentou menor porcentagem.

Como já discutido nas demais épocas experimentais, as porcentagens de plântulas normais do teste de envelhecimento acelerado tradicional apresentaram reduções expressivas quando comparadas com o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl devido às condições de estresse que as sementes são submetidas durante a execução do teste.

Considerando os resultados de emergência de plântulas em campo e índice de velocidade de emergência das três épocas experimentais para o cultivar A, a primeira e segunda época apresentaram a mesma classificação dos lotes, sendo os lotes A1, A2 e A3 apresentaram melhor desempenho em relação aos demais lotes e na terceira época experimental apresentou maior estratificação dos lotes, sendo os lotes A1, A2, A3, A6 e A9 apresentaram melhor desempenho em relação aos demais lotes. Quanto ao cultivar B, o teste de emergência de plântulas não indicou diferenças significativas ($p \leq 0,05$) e o índice de velocidade de emergência indicou diferenças significativas somente na primeira época.

Com base nos dados das variáveis climáticas (Figura 6) é possível afirmar que a temperatura não interferiu na redução emergência das plântulas em campo e no índice de velocidade de emergência, como verificado na primeira e segunda época experimental. Apresentou temperaturas médias acima de 20°C durante toda a execução do teste. O uso do sistema de irrigação supriu as necessidades das plantas, visto que ocorreram baixas precipitações pluviais.

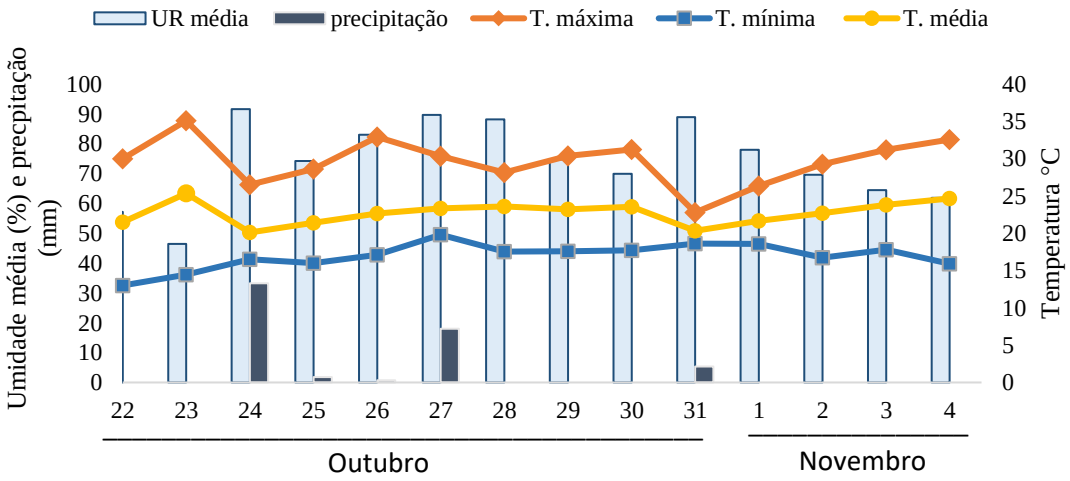


Figura 6. Variáveis climáticas: temperaturas máximas, médias e mínimas, umidade relativa do ar (UR) e precipitação pluvial durante a condução do teste de emergência de plântulas em campo na terceira época de avaliação. Fonte – Base de dados da estação meteorológica automática área de agrometeorologia - LEB - ESALQ - USP - Piracicaba, SP, 2021.

Na Tabela 24 estão apresentados os resultados das análises Vigor-S e nas Tabelas 25 e 26 os resultados das análises Vigor-S após o envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl, referentes aos dois cultivares.

Quanto às análises Vigor-S do cultivar A, o índice de vigor indicou os lotes A2 e A3 como os mais vigorosos e os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 apresentaram menores valores. Para o comprimento de raiz, o lote A1 apresentou desempenho superior e os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 apresentaram desempenho inferior. Em relação ao comprimento médio de plântulas e comprimento de hipocótilo, os lotes A2 e A3 apresentaram melhor desempenho em relação aos lotes A5, A7, A8 e A9.

De acordo com os resultados da Tabela 24, na análise Vigor-S tradicional todos os parâmetros avaliados, exceto para o comprimento de raiz, apresentaram semelhanças na classificação dos lotes mais vigorosos (A2 e A3). Em comparação com os testes tradicionais apresentados na Tabela 23, os lotes A1, A2 e A3 evidenciaram melhor desempenho em relação aos demais lotes do cultivar A, os resultados obtidos nas análises Vigor-S tradicional permitiram a estratificação dos lotes de maior vigor. Essa classificação dos lotes mais vigorosos não foi condizente com os resultados obtidos na primeira e segunda época experimental, as quais apresentaram os lotes A1, A2 e A3 com melhor desempenho, ou seja, classificação semelhante aos demais testes.

A classificação dos lotes do cultivar B foi semelhante para o índice de vigor, comprimento médio de plântulas e comprimento de raiz nas análises Vigor-S, sendo assim, o lote B6 apresentou maior valor e os lotes B3, B7 e B9 apresentaram menores valores. Essa classificação dos lotes foi condizente com o teste de envelhecimento acelerado tradicional (Tabela 23) e com os resultados da primeira e segunda época experimental, sendo que os lotes B6 e B9 apresentaram melhor e pior desempenho, respectivamente e isso ocorreu nas três épocas experimentais, entretanto, na terceira época, os lotes B3 e B7 também apresentaram desempenho inferior.

Dessa forma, as análises obtidas pelo sistema Vigor-S apresentaram maior sensibilidade na estratificação dos lotes quanto ao vigor para os dois cultivares. Rodrigues *et al.* (2020), relataram que o sistema Vigor-S além de apresentar avaliação detalhada e precisa de plântulas, os efeitos dos genótipos não afetam significativamente os resultados. Sendo um fator importante para a padronização de um teste de vigor.

Tabela 24. Índices de vigor (IV) e de uniformidade de desenvolvimento (IU), comprimento médio de plântulas (CP), comprimento de hipocótilo (CH) e comprimento de raiz (CR) obtidos em análises Vigor-S, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na terceira época de avaliação.

Lotes	(IV)[2]	(IU)[2]	(CP)[2]	(CH)[2]	(CR)[2]
	----- índice -----		---------- cm ----------		
			Cultivar A		
A1	588 B	675 B	7,32 B	2,32 B	4,92 B
A2	732 A	796 A	9,00 A	2,66 A	6,33 A
A3	693 A	771 A	8,58 A	2,67 A	5,31 B
A4	314 C	583 C	3,40 C	1,73 C	1,67 C
A5	270 C	594 C	2,30 D	1,19 D	1,10 C
A6	301 C	534 C	3,32 C	1,62 C	1,72 C
A7	284 C	563 C	2,80 D	1,40 D	1,39 C
A8	272 C	559 C	2,68 D	1,45 D	1,23 C
A9	287 C	586 C	2,80 D	1,44 D	1,34 C
Média	416	629	4,68	1,83	2,78
CV (%)	11,69	10,90	12,56	12,17	24,92
			Cultivar B		
B1	794 B	763 A	9,57 B	2,23 A	7,35 B
B2	770 B	776 A	9,17 B	2,18 A	6,97 B
B3	636 C	676 A	7,64 C	2,05 A	5,59 C
B4	818 B	760 A	9,92 B	2,22 A	7,68 B
B5	765 B	731 A	9,68 B	2,63 A	7,04 B
B6	884 A	752 A	11,06 A	2,39 A	8,65 A
B7	698 C	738 A	8,10 C	1,91 A	6,19 C
B8	778 B	724 A	9,44 B	2,12 A	7,29 B
B9	685 C	702 A	8,20 C	2,06 A	6,14 C
B10	786 B	715 A	9,62 B	2,20 A	7,43 B
Média	761	734	9,24	2,20	7,03
CV (%)	7,71	8,11	8,35	13,59	8,49

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Com relação aos resultados das análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional dos lotes do cultivar A (Tabela 25), o índice de vigor e o comprimento médio de plântulas indicaram a mesma separação dos lotes, ou seja, os lotes A1, A2 e A3 apresentaram melhor desempenho em comparação com os demais lotes. Para o comprimento médio de plântulas, os lotes A1 e A3 apresentaram maiores valores e os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 evidenciaram menores valores. Para o comprimento de hipocótilo, o lote A3 apresentou melhor desempenho, com os lotes A1 e A2 evidenciando posição intermediária e os demais lotes ocupando desempenho inferior.

Tabela 25. Índices de vigor (IV) e de uniformidade de desenvolvimento (IU), comprimento médio de plântulas (CP), comprimento de hipocótilo (CH) e comprimento de raiz (CR) obtidos em análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A), na terceira época de avaliação.

EAT (41°C/48h)						
Lotes	**(IV)[2]**	**(IU)[2]**	**(CP)[2]**	**(CH)[2]**	**(CR)[2]**	**T.A.EAT**
	----- índice -----		**---------- cm ----------**			**%**
A1	288 A	424 B	3,52 A	1,57 B	1,91 A	23,3
A2	272 A	461 B	3,12 B	1,47 B	1,63 A	24,3
A3	300 A	477 B	3,68 A	1,75 A	1,91 A	24,9
A4	193 B	564 A	0,68 C	0,41 C	0,27 B	24,9
A5	206 B	600 A	0,78 C	0,47 C	0,30 B	22,3
A6	208 B	617 A	0,66 C	0,40 C	0,25 B	25,7
A7	189 B	554 A	0,64 C	0,36 C	0,26 B	23,4
A8	160 B	451 B	0,68 C	0,38 C	0,28 B	23,4
A9	139 B	401 B	0,56 C	0,33 C	0,21 B	23,3
Média	217	506	1,59	0,79	0,78	-
CV (%)	21,32	25,34	18,62	16,23	27,64	-
EASS (41°C/72h)						
A1	539 A	687 A	6,50 B	2,27 A	4,02 B	12,0
A2	596 A	708 A	7,42 A	2,53 A	4,86 A	11,8
A3	564 A	654 A	6,96 A	2,47 A	4,50 A	12,0
A4	246 B	509 A	2,38 C	1,26 B	1,12 C	11,7
A5	262 B	604 A	2,12 D	1,66 B	0,96 C	11,5
A6	278 B	615 A	2,40 C	1,26 B	1,11 C	11,7
A7	254 B	610 A	1,96 D	1,12 B	0,82 C	11,7
A8	234 B	619 A	1,42 E	0,87 C	0,56 C	11,7
A9	256 B	624 A	1,85 D	1,05 B	0,80 C	11,5
Média	359	625	3,66	1,55	2,08	-
CV (%)	8,18	11,08	10,43	13,43	16,82	-

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Quanto às análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, das sementes dos lotes do cultivar A (Tabela 25), o índice de vigor discriminou os lotes A1, A2 e A3 como os de melhor desempenho em relação aos demais lotes. Para o comprimento médio de plântulas, os lotes A2 e A3 apresentaram maiores valores e o lote A8 evidenciou menor valor. Para o comprimento de hipocótilo, os lotes A1, A2 e A3 apresentaram maiores valores em relação ao lote A8 que apresentou menor valor. Quanto ao comprimento de raiz, os lotes A2 e A3 apresentaram melhor desempenho e os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 evidenciaram desempenho inferior.

O índice de vigor e o comprimento de raiz avaliados nas análises Vigor-S após envelhecimento acelerado tradicional, e o índice de vigor e comprimento de hipocótilo avaliados nas análises Vigor-S após envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, apresentaram semelhança na

classificação dos lotes de maior vigor. Essa classificação foi condizente com os resultados obtidos na primeira e segunda época experimental.

Em relação ao cultivar B, os resultados das análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional, o índice de vigor, comprimento médio de plântulas, comprimento de hipocótilo e comprimento de raiz, os lotes B4, B6 e B10 apresentaram melhor desempenho em relação aos lotes B3 e B9 que apresentaram desempenho inferior (Tabela 26).

Tabela 26. Índices de vigor (IV) e de uniformidade de desenvolvimento (IU), comprimento médio de plântulas (CP), comprimento de hipocótilo (CH) e comprimento de raiz (CR) obtidos em análises Vigor-S após o teste de envelhecimento tradicional e envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na terceira época de avaliação.

EAT (41°C/48h)						
Lotes	**(IV)[2]**	**(IU)[2]**	**(CP)[2]**	**(CH)[2]**	**(CR)[2]**	**T.A.EAT**
	----- índice -----		**---------- cm ----------**			**%**
B1	625 B	776 A	7,38 C	2,37 B	5,00 B	23,4
B2	485 C	668 B	5,80 D	2,19 B	3,60 C	23,6
B3	422 D	635 B	4,66 E	1,72 C	2,92 D	23,2
B4	678 A	720 A	8,58 B	2,67 A	5,91 A	22,5
B5	524 C	736 A	6,12 D	2,28 B	3,82 C	24,8
B6	714 A	732 A	9,16 A	2,81 A	6,33 A	23,7
B7	566 B	686 A	6,78 C	2,18 B	4,59 B	22,5
B8	588 B	718 A	6,84 C	2,06 B	4,78 B	23,2
B9	388 D	576 C	4,28 E	1,56 C	2,71 D	23,6
B10	674 A	751 A	8,24 B	2,48 A	5,75 A	23,6
Média	567	700	6,78	2,23	4,54	-
CV (%)	7,65	7,08	8,18	9,67	9,72	-
EASS (41°C/72h)						
B1	768 B	776 A	9,60 B	2,71 A	6,89 B	12,0
B2	705 C	807 A	8,24 C	2,24 A	5,96 C	11,9
B3	654 C	741 A	8,12 C	2,59 A	5,51 C	12,2
B4	840 A	781 A	10,48 A	2,60 A	7,85 A	11,9
B5	763 B	768 A	9,62 B	2,75 A	6,85 B	12,2
B6	821 A	781 A	10,20 A	2,63 A	7,59 A	11,9
B7	844 A	814 A	10,46 A	2,70 A	7,75 A	12,1
B8	838 A	801 A	10,52 A	2,77 A	7,73 A	12,1
B9	827 A	810 A	10,14 A	2,55 A	7,56 A	12,1
B10	792 B	768 A	9,78 B	2,50 A	7,28 B	12,3
Média	785	785	9,71	2,61	7,10	-
CV (%)	5,52	5,63	6,14	10,08	6,88	-

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [1] Dados transformados em arc sen $(x/100)^{1/2}$, [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Quanto à análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, os lotes B4, B6, B7, B8 e B9 apresentaram maiores valores, os lotes B2 e B3 evidenciaram menores valores para o índice de vigor, comprimento médio de plântulas e comprimento de raiz. Quanto ao comprimento de hipocótilo não houve diferenças significativas entre os lotes.

Para o cultivar B, todos os parâmetros avaliados na análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional apresentaram semelhança na classificação dos lotes. Na análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl a classificação dos lotes de melhor e pior desempenho apresentou informações contrastantes nos parâmetros avaliados, não condizentes com os resultados dos testes tradicionais de vigor, análises Vigor-S e Vigor-S após envelhecimento acelerado tradicional.

Em suma, considerando os resultados dos testes tradicionais da terceira época experimental (Tabela 23), os lotes de maior vigor (A1, A2 e A3) do cultivar A, apresentaram a mesma classificação na análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional no índice de vigor e comprimento de raiz e análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl nos parâmetros de índice de vigor e comprimento de hipocótilo. Em relação ao cultivar B, os lotes B4 e B6 apresentaram melhor desempenho e o B9 pior desempenho. Essa classificação foi observada no teste de envelhecimento acelerado tradicional, todos os parâmetros avaliados nas análises Vigor-S sem envelhecimento das sementes e Vigor-S após envelhecimento acelerado tradicional.

Com relação aos teores de água das sementes após o envelhecimento acelerado (Tabelas 25 e 26) os lotes do cultivar A apresentaram variações de 22,3% a 25,7% na análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional e 11,5% a 12,0% na análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl. Para o cultivar B, as variações foram de 22,5% a 24,8% e 11,9% a 12,3% nas análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl, respectivamente. As variações no teor de água não foram superiores a 4 pontos percentuais para ambos os cultivares, assegurando confiabilidade dos resultados.

Quanto ao índice de uniformidade de desenvolvimento de plântulas do cultivar A, na análise Vigor-S tradicional, os maiores valores foram obtidos nos lotes de maior vigor (A2 e A3); na análise Vigor-S após envelhecimento acelerado tradicional não foi verificada essa relação entre o índice de uniformidade e os lotes de maior vigor; na análise após envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl não houve diferenças significativas entre os lotes. Para o cultivar B, o índice de uniformidade de desenvolvimento apresentou relação com os lotes de maior e menor desempenho na análise Vigor-S após envelhecimento acelerado tradicional, e nas análises Vigor-S tradicional e Vigor-S após envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl não foram observadas diferenças significativas entre os lotes

O índice de vigor fornecido pelo Vigor-S apresentou eficiência na discriminação dos lotes de maneira semelhante aos testes tradicionais para determinação do vigor de sementes de soja. Rodrigues *et al* (2020) também verificaram que o índice de vigor é sensível para identificar diferenças entre os

lotes de sementes de soja. Para sementes de melão Leite (2020) observou que o índice de vigor foi eficiente na discriminação de lotes quanto ao vigor de maneira semelhante aos resultados da maioria dos testes de vigor utilizados.

4.3.2. Avaliação da protrusão da raiz primária

Com base no princípio da determinação da precocidade da protrusão da raiz primária, as sementes com maior vigor emitem a raiz primária mais rapidamente do que menos vigorosas, quando se comparam diferentes lotes (Pereira *et al.*, 2012). Os resultados da porcentagem de protrusão da raiz primária avaliados visualmente (comprimento ≥ 1 mm) estão apresentados na Tabela 27.

Não foram observadas diferenças significativas entre os lotes do cultivar A, nas condições de germinação a 20 °C / 48h, 25 °C / 24h, 25 °C / 30h e 30 °C / 30h e do cultivar B nas condições a 25 °C / 30h, 30 °C / 24h e 30 °C / 30h. Porém, no tratamento de 20 °C / 30h o lote A1 apresentou desempenho superior em relação aos demais lotes. Já a 30 °C / 24h, os lotes A2 e A3 apresentaram maiores valores em relação ao restante dos lotes do cultivar A.

Para o cultivar B, nas condições de germinação a 20 °C / 30h os lotes B1, B4 e B5 apresentaram maiores valores em comparação com os demais lotes; no tratamento 20 °C / 48h os lotes B1, B2, B3, B5, B6, B7 e B10 apresentaram melhor desempenho e o lote B9 evidenciou desempenho inferior. Na condição a 25 °C / 24h os lotes B7 e B9 apresentaram menores valores em relação aos demais lotes.

Os resultados obtidos através da avaliação visual no tratamento 30 °C / 24h apresentaram a mesma classificação dos lotes do cultivar A, nos testes de vigor tradicional os testes de condutividade elétrica, índice de vigor, comprimento médio de plântulas e comprimento de hipocótilo na análise Vigor-S, comprimento médio de plântulas e comprimento de raiz na análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl. Para o cultivar B, o lote B9 apresentou desempenho inferior em relação aos demais lotes e essa classificação foi semelhante à observada no teste de envelhecimento acelerado tradicional.

Outro propósito desta pesquisa consistiu na avaliação da eficiência do *software* ImageJ utilizando atributos morfodimensionais para identificar a protrusão da raiz primária, comparando com os testes tradicionalmente utilizados para associação com o vigor de sementes de soja (Tabelas 23 e 24). A partir das análises utilizando o *software* ImageJ foram obtidos parâmetros morfológicos das sementes como perímetro, área, circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity*, que estão apresentados nas Tabelas 28 a 33. Os parâmetros morfológicos das sementes e plântulas permitem classificar lotes com base no desempenho fisiológico, selecionando lotes com maior vigor (Abud *et al*. 2022).

Tabela 27. Porcentagem de plântulas com protrusão da raiz primária (P.R.P.) obtidas na avaliação visual após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na terceira época de avaliação.

	%P.R.P.[1]					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	5 A	91 A	13 A	60 A	60 B	91 A
A2	0 B	91 A	8 A	73 A	73 A	95 A
A3	0 B	86 A	11 A	72 A	74 A	90 A
A4	1 B	75 A	5 A	63 A	60 B	80 A
A5	1 B	84 A	10 A	52 A	52 B	86 A
A6	0 B	73 A	8 A	58 A	53 B	89 A
A7	0 B	71 A	4 A	57 A	51 B	83 A
A8	1 B	63 A	2 A	49 A	55 B	87 A
A9	0 B	81 A	5 A	59 A	51 B	85 A
Média	0,89	72,8	7,3	60,3	58,8	87,3
CV (%)	196,6	22,8	75,7	22,1	16,9	8,5
			Cultivar B			
B1	30 A	100 A	49 A	86 A	91 A	99 A
B2	17 B	98 A	45 A	81 A	86 A	93 A
B3	15 B	96 A	34 A	86 A	89 A	93 A
B4	22 A	92 B	57 A	90 A	82 A	97 A
B5	22 A	96 A	48 A	82 A	87 A	93 A
B6	18 B	94 A	46 A	80 A	91 A	92 A
B7	17 B	97 A	15 B	71 A	84 A	92 A
B8	18 B	90 B	40 A	78 A	79 A	100 A
B9	8 B	84 C	19 B	76 A	87 A	97 A
B10	19 B	95 A	49 A	92 A	95 A	96 A
Média	18,6	94,2	40,2	82,2	87,1	95,2
CV (%)	35,8	5,5	38,5	12,5	9,54	5,75

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [1] Dados transformados em arc sen $(x/100)^{1/2}$.

Foram observadas diferenças significativas entre os lotes do cultivar A nos diferentes tratamentos de temperatura e período de germinação. No tratamento 20 °C / 30h os lotes A1, A5, A8 e A9 evidenciaram maiores valores de perímetro e o lote A3 menor valor. Na condição a 20 °C / 48h, o lote A1 apresentou maior valor em comparação com os lotes A4, A6 e A7 de menores valores. Na condição a 25 °C / 24h os lotes A5 e A9 apresentaram maiores valores e os lotes A2, A3, A4, A6 e A7 apresentaram menores valores. No tratamento 25 °C / 30h os lotes A1, A2, A3, A5, A8 e A9 apresentaram maiores valores em relação aos demais lotes. No tratamento 30 °C / 24h, os lotes A1, A2, A5, A8 e A9 apresentaram menores valores em relação ao restante dos lotes. Na condição de 30 °C /

30h os lotes A1, A2 e A3 apresentaram os maiores valores em relação aos lotes A4, A6 e A7 que apresentaram menores valores (Tabela 28).

Tabela 28. Resultados de perímetro de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na terceira época de avaliação

	Perímetro (mm)[2]					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	34,29 A	40,86 A	33,82 B	37,07 A	36,78 A	46,04 A
A2	32,49 B	39,20 B	32,59 C	37,05 A	36,55 A	46,05 A
A3	31,40 C	36,65 C	31,82 C	36,77 A	35,05 B	46,33 A
A4	32,43 B	35,37 D	32,44 C	34,78 B	34,35 B	36,70 C
A5	35,55 A	37,98 B	35,06 A	37,17 A	36,21 A	40,43 B
A6	32,69 B	34,23 D	32,27 C	34,53 B	33,91 B	37,77 C
A7	32,92 B	34,13 D	32,72 C	34,54 B	33,98 B	36,75 C
A8	34,84 A	36,86 C	34,28 B	37,26 A	36,66 A	40,88 B
A9	34,81 A	38,19 B	34,95 A	36,99 A	37,22 A	39,78 B
Média	33,49	37,05	33,33	36,24	35,63	41,19
CV (%)	1,95	2,60	1,94	3,37	2,25	4,32
			Cultivar B			
B1	35,22 B	53,11 A	36,42 B	41,82 B	43,85 C	58,38 A
B2	37,54 A	53,37 A	38,09 A	43,73 A	44,99 B	55,98 B
B3	34,70 B	46,61 C	36,21 B	42,38 B	42,78 C	50,22 B
B4	35,64 B	50,39 B	36,93 B	44,48 A	62,50 A	62,36 A
B5	33,36 C	46,65 C	34,66 C	40,61 C	42,10 C	60,81 A
B6	35,15 B	51,70 A	36,80 B	43,21 A	45,57 B	56,50 B
B7	35,24 B	49,62 B	35,29 C	39,97 C	43,38 C	56,85 B
B8	35,78 B	49,39 B	36,44 B	41,53 B	43,66 C	56,97 B
B9	35,31 B	45,38 C	35,44 C	39,79 C	42,27 C	54,24 B
B10	35,38 B	50,82 B	36,91 B	45,30 A	46,39 B	60,59 A
Média	35,33	49,70	36,32	42,28	45,75	56,29
CV (%)	2,23	4,38	2,29	3,68	4,76	7,03

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Para o cultivar B, em todos os tratamentos foram observadas diferenças significativas entre os lotes. No tratamento 20 °C / 30h o lote B2 apresentou maior valor de perímetro e o lote B5 evidenciou menor valor. Na condição a 20 °C / 48h os lotes B1, B2 e B6 apresentaram maiores valores e os lotes B3, B5 e B9 apresentaram menores valores. No tratamento 25 °C / 24h o lote B2 apresentou maior valor e os lotes B5, B7 e B9 apresentaram menores valores. O tratamento 25 °C / 30h os lotes B2, B4, B6 e B10 apresentaram maiores valores, os lotes B5, B7 e B9 apresentaram menores valores. Na condição a 30 °C / 24h, os lotes B1, B3, B5, B7, B8 e B9 evidenciaram menores valores e o lote B4 maior valor.

No tratamento 30 °C / 30h, os lotes B1, B4, B5 e B10 apresentaram maior valor em relação aos demais lotes.

Os resultados de área das sementes do cultivar A estão apresentados na Tabela 29. Nas condições a 20 °C / 30h os lotes A1, A5, A8 e A9 apresentaram maiores valores e o lote A3 apresentou menor valor. No tratamento 20 °C / 48h os lotes A5, A8 e A9 apresentaram maiores valores em relação aos lotes A3, A6 e A7. No tratamento 25 °C / 24h, os lotes A5, A8 e A9 apresentaram maiores valores e os lotes A2, A3, A4, A6 e A7 apresentaram menores valores e o lote A1 evidenciou posição intermediária. Na condição a 25 °C / 30h os lotes A1, A5, A8 e A9 evidenciaram maiores valores em relação aos demais lotes. No tratamento 30 °C / 24h os lotes A8 e A9 apresentaram maior valor em relação ao lote A3. No tratamento 30 °C / 30h os lotes A1, A5, A8 e A9 evidenciaram maior valor em relação ao lote A4.

Verificou-se que nos tratamentos 20 °C / 30h, 20 °C / 48h, 25 °C / 24h e 25 °C / 30h do parâmetro área apresentaram semelhante separação dos lotes do cultivar B, sendo o lote B2 apresentou maiores valores em relação ao lote B5. Na condição de germinação a 30 °C / 24h, os lotes B2 e B4 apresentaram maiores valores e o lote B5 apresentou menor valor. No tratamento 30 °C / 30h, o lote B2 apresentou maior valor e os lotes B1, B3, B5, B7, B8 e B9 apresentaram menores valores (Tabela 29).

Para o cultivar A, os lotes A4, A6 e A7 apresentaram menores valores com base no perímetro em relação aos demais lotes; essa classificação foi semelhante à observada nos testes de condutividade elétrica, índice de vigor, comprimento de raiz nas análises Vigor-S (Tabelas 23 e 24), índice de vigor, comprimento médio de plântulas, comprimento de raiz e comprimento de hipocótilo nas análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional, índice de vigor pela análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl (Tabela 25) e todos os tratamentos avaliados na avaliação da porcentagem de protrusão da raiz primária (Tabela 27).

Entretanto, os parâmetros de perímetro apresentaram incoerência com os demais resultados, pois os lotes A4, A6 e A7 apresentaram menores valores e os lotes A1, A8 e A9 maiores valores, e nos testes tradicionais de vigor, o lote A1 apresentou melhor desempenho em relação aos lotes A8 e A9.

Para o cultivar B, o lote B2 apresentou desempenho superior e os lotes B5 e B9 evidenciaram desempenho inferior, esta classificação apresentou semelhança no teste de condutividade elétrica. Entretanto, comparando-se os resultados da porcentagem de plântulas com protrusão da raiz primária, o lote B5 apresentou melhor desempenho nos tratamentos avaliados, e no tratamento 20 °C / 30h, o lote B2 e B9 apresentou pior desempenho.

Em suma, os lotes A8 e A9, do cultivar A, apresentaram maiores valores de área para todos os tratamentos e o lote A3 apresentou menor desempenho nos tratamentos avaliados. A classificação dos lotes não apresentou semelhança com os demais testes já discutidos. Dessa forma, a separação dos lotes com base na determinação da área foi divergente da observada nos testes de envelhecimento acelerado tradicional e condutividade elétrica, ou seja, o lote A3 apresentou melhor desempenho e os lotes A8 e A9 apresentaram piores desempenhos (Tabela 23).

Em relação ao cultivar B, os lotes B2 e B5 apresentaram melhor e pior desempenho nos tratamentos avaliados, respectivamente. A classificação dos lotes quanto à área apresentou semelhança no teste de condutividade elétrica (Tabela 23). Entretanto, não foi condizente com os resultados de porcentagem de plântulas com protrusão da raiz primária, sendo que o lote B2 apresentou pior desempenho e o lote B5 melhor desempenho.

Tabela 29. Resultados de área de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na terceira época de avaliação.

	Área (mm²)[2]					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	79,70 A	80,63 B	77,25 B	83,23 A	82,04 B	87,64 A
A2	72,14 B	76,39 C	71,86 C	78,40 B	76,59 C	83,93 B
A3	67,42 C	70,13 D	68,18 C	74,88 B	70,97 D	79,68 C
A4	71,02 B	75,58 C	70,75 C	75,79 B	74,84 C	72,10 E
A5	84,63 A	85,32 A	82,70 A	87,84 A	84,12 B	87,88 A
A6	72,30 B	72,19 D	69,65 C	75,70 B	73,75 C	74,82 D
A7	72,72 B	72,74 D	71,92 C	76,60 B	74,32 C	76,20 D
A8	81,52 A	84,80 A	79,22 A	87,86 A	86,12 A	88,07 A
A9	81,28 A	85,22 A	81,86 A	86,12 A	87,84 A	87,06 A
Média	75,86	78,11	74,82	80,57	78,95	81,93
CV (%)	3,79	2,76	3,67	3,87	3,06	2,89
			Cultivar B			
B1	81,14 B	93,91 B	83,20 B	88,98 D	89,09 B	97,79 C
B2	93,72 A	104,88 A	92,63 A	103,10 A	102,05 A	105,87 A
B3	80,12 B	89,29 C	83,69 B	91,64 C	90,77 B	92,83 C
B4	83,42 B	91,92 B	83,86 B	90,21 C	100,45 A	100,36 B
B5	73,72 C	82,50 D	75,24 C	81,68 E	81,11 C	93,53 C
B6	81,29 B	92,94 B	83,86 B	90,77 C	91,98 B	94,70 C
B7	81,83 B	93,83 B	83,20 B	87,48 D	91,03 B	98,36 C
B8	84,56 B	93,93 B	85,64 B	92,17 C	93,88 B	97,04 C
B9	83,17 B	92,86 B	82,03 B	88,70 D	91,34 B	96,40 C
B10	82,65 B	94,40 B	84,41 B	96,05 B	92,92 B	100,68 B
Média	82,56	93,05	83,78	91,08	92,46	97,76
CV (%)	4,18	2,60	3,24	2,45	3,18	3,90

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Dell'Aquila *et al.* (2000), utilizando técnicas de análise de imagens e descritores morfológicos, como a área das sementes para descrever as alterações no tamanho, constaram alta sensibilidade e acurácia desse parâmetro para monitorar a germinação e identificar o momento da protrusão da raiz primária de sementes de repolho. Entretanto, os parâmetros perímetro e área não apresentaram

resultados eficientes para caracterizar a protrusão da raiz primária, condizendo com os resultados obtidos na primeira e segunda época experimental.

Com relação aos resultados de circularidade das sementes do cultivar A, não foram encontradas diferenças significativas entre os lotes no tratamento 25 °C / 24h. Entretanto, nos demais tratamentos foram observadas diferenças entre os lotes. No tratamento 20 °C / 30h os lotes A5, A7, A8 e A9 apresentaram menores valores e os lotes A2 e A3 apresentaram maiores valores. No tratamento 20 °C / 48h os lotes A1 e A2 apresentaram melhor desempenho em relação aos lotes A6, A7 e A8. Na condição a 25 °C / 30h os lotes A2 e A3 evidenciaram melhor desempenho em relação aos demais lotes. Nos tratamentos 30 °C / 24h e 30 °C / 30h, os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 apresentaram maiores valores, porém, no tratamento 30 °C / 24h os lotes A2 e A3 apresentaram menores valores, e no tratamento 30 °C / 30h o lote A3 apresentou menor valor.

Em relação ao cultivar B, não houve diferenças significativas entre os lotes no tratamento 20 °C / 30h. No tratamento 20 °C / 30h os lotes B1, B2, B4, B5, B6, B7, B8 e B10 apresentaram menores valores, o lote B9 apresentou maior valor e o lote B3 apresentou valor intermediário. Na condição a 25 °C / 24h os lotes B1, B4, B5, B6 e B10 apresentaram melhores desempenhos e o lote B7 apresentou pior desempenho. No tratamento 25 °C / 30h, os lotes B4 e B10 apresentaram menores valores e os lotes B2, B7, B8 e B9 apresentaram maiores valores. Na condição a 30 °C / 24h o lote B4 apresentou melhor desempenho e os lotes B2, B3, B7, B8 e B9 apresentaram desempenho inferior. No tratamento 30 °C / 30h os lotes B1, B4, B5, B8 e B10 apresentaram desempenho superior em relação aos demais lotes.

No geral, em relação ao cultivar A, os tratamentos 25 °C / 30h, 30 °C / 24h e 30 °C / 30h os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 apresentaram pior desempenho em relação aos demais lotes, seguindo a mesma discriminação nos testes de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, condutividade elétrica, o índice de vigor, comprimento de raiz na análise Vigor-S, todos os parâmetros avaliados na análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional, índice de vigor e comprimento de raiz pelas avaliados na análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl. Para o cultivar B, os lotes B4 e B9 apresentaram melhor e pior desempenho, respectivamente. Essa classificação foi observada nos testes de envelhecimento acelerado tradicional, condutividade elétrica, todos os parâmetros da análise Vigor-S, com exceção do comprimento médio de plântulas, todos os parâmetros da análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, nos tratamentos 20 °C / 30h e 25 °C / 24h da avaliação visual da porcentagem de plântulas com protrusão da raiz primária.

A determinação da circularidade foi eficiente para indicar a protrusão da raiz primária nas sementes de soja de ambos os cultivares, permitindo a classificação os lotes de maneira semelhante aos testes de vigor tradicionais. Em sementes de repolho, lentilha, pimenta e tomate este parâmetro de circularidade também apresentou eficiência para estabelecer o início da protrusão da raiz primária (Dell'Aquila, 2004a).

Tabela 30. Resultados de circularidade de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na terceira época de avaliação.

	Circularidade[2]					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	0,85 B	0,64 A	0,84 A	0,77 B	0,77 B	0,56 B
A2	0,86 C	0,65 A	0,84 A	0,74 A	0,73 A	0,55 B
A3	0,86 C	0,67 B	0,84 A	0,71 A	0,74 A	0,51 A
A4	0,85 B	0,76 C	0,84 A	0,78 B	0,80 C	0,68 C
A5	0,84 A	0,75 C	0,84 A	0,80 B	0,80 C	0,68 C
A6	0,85 B	0,78 D	0,83 A	0,80 B	0,80 C	0,67 C
A7	0,84 A	0,79 D	0,84 A	0,79 B	0,81 C	0,71 C
A8	0,84 A	0,79 D	0,84 A	0,79 B	0,80 C	0,67 C
A9	0,84 A	0,74 C	0,84 A	0,79 B	0,79 C	0,70 C
Média	0,84	0,72	0,84	0,77	0,78	0,64
CV (%)	0,66	3,36	0,78	3,13	2,21	5,63
			Cultivar B			
B1	0,82 A	0,44 A	0,79 A	0,66 B	0,60 B	0,40 A
B2	0,83 A	0,48 A	0,80 B	0,69 C	0,65 C	0,47 B
B3	0,83 A	0,53 B	0,80 B	0,66 B	0,64 C	0,50 B
B4	0,82 A	0,49 A	0,78 A	0,59 A	0,36 A	0,36 A
B5	0,83 A	0,49 A	0,79 A	0,64 B	0,60 B	0,37 A
B6	0,82 A	0,47 A	0,78 A	0,65 B	0,59 B	0,43 B
B7	0,82 A	0,50 A	0,93 C	0,71 C	0,63 C	0,43 B
B8	0,82 A	0,51 A	0,81 B	0,69 C	0,64 C	0,41 A
B9	0,83 A	0,60 C	0,82 B	0,72 C	0,66 C	0,46 B
B10	0,82 A	0,48 A	0,78 A	0,60 A	0,56 B	0,39 A
Média	0,83	0,50	0,80	0,66	0,60	0,43
CV (%)	1,05	7,61	2,28	5,47	6,46	12,17

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Na primeira e segunda época experimental, em todos os tratamentos, o parâmetro *roundness* apresentou a mesma separação dos lotes obtida pelo parâmetro *aspect ratio* para ambos os cultivares. Nesta terceira época, discriminação semelhante nesses dois parâmetros foi observada somente entre os lotes do cultivar A.

Os tratamentos 20 °C / 30h, 20 °C / 48h, 25 °C / 24h, 25 °C / 30h e 30 °C / 24h do parâmetro *aspect ratio* e *roundness* discriminaram os lotes A1, A2 e A3 como de melhor desempenho em relação aos demais lotes, com maiores e menores valores de *aspect ratio* e *roundness*, respectivamente. No tratamento 30 °C / 30h não houve diferenças significativas entre os lotes.

Para o cultivar B, o tratamento 20 °C / 30h não revelou diferenças significativas entre os lotes. No tratamento 20 °C / 48h os lotes B2 e B3 evidenciaram desempenho superior em relação aos demais lotes, ou seja, menores valores de *aspect ratio* e maiores valores de *roundness*. Na condição a 25 °C / 24h os lotes B1, B2, B4, B6 e B10 apresentaram desempenho superior em relação aos demais lotes, com valores menores de *aspect ratio* e valores maiores de *roundness*. No tratamento 25 °C / 30h os lotes B1, B2, B3, B4, B5, B6 e B10 apresentaram desempenho superior em relação aos demais lotes, ou seja, maiores e menores valores de *aspect ratio* e *roundness*, respectivamente. Na condição a 30 °C / 24h o lote B4 apresentou desempenho superior em relação aos demais lotes, com maior valor de *aspect ratio* e menor valor de *roundness*. Em 30 °C / 30h os lotes B2, B3 e B9 apresentaram menores valores e os lotes B4 e B5 evidenciaram maiores valores de *aspect ratio*.

Na condição a 30 °C / 30h os lotes B1, B2, B3, B7, B8 e B9 apresentaram maiores valores de *roundness* e os lotes B4 e B5 apresentaram menores valores (Tabela 32).

Na discriminação dos lotes do cultivar A quanto ao *aspect ratio e roundness*, os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 apresentaram pior desempenho em relação aos demais lotes. Nos testes de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, condutividade elétrica, índice de vigor, comprimento de raiz na análise Vigor-S, todos os parâmetros na análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado tradicional, índice de vigor e comprimento de raiz na análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl também foi possível observar a mesma classificação dos lotes.

Em relação ao cultivar B, os lotes B2 e B5 apresentaram melhor e pior desempenho, respectivamente. De acordo com os demais testes de vigor, os testes de condutividade elétrica e todos os tratamentos da porcentagem da protrusão da raiz primária também apresentaram a mesma separação dos lotes.

Tabela 31. Resultados de relação de aspecto (*aspect ratio* - AR) de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na terceira época de avaliação.

	AR[2]					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	1,48 A	1,32 A	1,46 A	1,38 A	1,39 A	1,39 A
A2	1,46 A	1,29 A	1,45 A	1,36 A	1,36 A	1,45 A
A3	1,46 A	1,31 A	1,48 A	1,36 A	1,35 A	1,44 A
A4	1,51 B	1,41 B	1,52 B	1,44 B	1,45 B	1,37 A
A5	1,54 B	1,44 B	1,50 B	1,47 B	1,49 B	1,38 A
A6	1,52 B	1,43 B	1,52 B	1,45 B	1,47 B	1,34 A
A7	1,55 B	1,45 B	1,53 B	1,43 B	1,46 B	1,39 A
A8	1,53 B	1,46 B	1,52 B	1,46 B	1,46 B	1,38 A
A9	1,55 B	1,42 B	1,54 B	1,48 B	1,48 B	1,39 A
Média	1,51	1,39	1,50	1,43	1,43	1,39
CV (%)	2,21	2,47	1,94	2,62	2,67	3,89
			Cultivar B			
B1	1,53 A	1,42 D	1,49 A	1,33 A	1,32 A	1,57 B
B2	1,49 A	1,28 A	1,49 A	1,36 A	1,35 A	1,48 A
B3	1,54 A	1,25 A	1,51 B	1,36 A	1,33 A	1,37 A
B4	1,53 A	1,37 C	1,45 A	1,31 A	1,83 B	1,82 C
B5	1,53 A	1,30 B	1,51 B	1,33 A	1,32 A	1,94 C
B6	1,53 A	1,41 D	1,48 A	1,35 A	1,35 A	1,63 B
B7	1,53 A	1,30 B	1,53 B	1,40 B	1,34 A	1,60 B
B8	1,56 A	1,31 B	1,51 B	1,39 B	1,37 A	1,61 B
B9	1,53 A	1,31 B	1,55 B	1,40 B	1,38 A	1,52 A
B10	1,52 A	1,36 C	1,49 A	1,32 A	1,31 A	1,68 B
Média	1,53	1,33	1,50	1,36	1,39	1,62
CV (%)	2,42	2,40	2,48	2,43	4,64	8,05

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Tabela 32. Resultados de redondeza (*roundness*) de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na terceira época de avaliação.

	***Roundness*[2]**					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	0,68 A	0,76 A	0,68 A	0,72 A	0,72 A	0,74 A
A2	0,69 A	0,78 A	0,68 A	0,73 A	0,74 A	0,72 A
A3	0,69 A	0,76 A	0,67 A	0,74 A	0,74 A	0,71 A
A4	0,67 B	0,71 B	0,65 B	0,69 B	0,69 B	0,73 A
A5	0,65 B	0,69 B	0,66 B	0,68 B	0,67 B	0,73 A
A6	0,66 B	0,70 B	0,65 B	0,69 B	0,68 B	0,75 A
A7	0,65 B	0,69 B	0,65 B	0,70 B	0,68 B	0,72 A
A8	0,65 B	0,68 B	0,66 B	0,68 B	0,68 B	0,73 A
A9	0,65 B	0,70 B	0,65 B	0,67 B	0,67 B	0,72 A
Média	0,66	0,72	0,66	0,70	0,70	0,73
CV (%)	2,25	2,57	1,89	2,58	2,85	3,06
			Cultivar B			
B1	0,65 A	0,72 D	0,67 A	0,76 A	0,76 A	0,67 A
B2	0,67 A	0,79 A	0,67 A	0,74 A	0,74 A	0,70 A
B3	0,65 A	0,80 A	0,66 B	0,74 A	0,76 A	0,74 A
B4	0,65 A	0,74 C	0,69 A	0,77 A	0,60 B	0,60 C
B5	0,65 A	0,78 B	0,66 B	0,75 A	0,76 A	0,56 C
B6	0,65 A	0,72 D	0,68 A	0,74 A	0,75 A	0,64 B
B7	0,65 A	0,78 B	0,65 B	0,71 B	0,75 A	0,66 A
B8	0,64 A	0,77 B	0,66 B	0,72 B	0,73 A	0,66 A
B9	0,65 A	0,77 B	0,64 B	0,71 B	0,72 A	0,69 A
B10	0,65 A	0,75 C	0,67 A	0,76 A	0,77 A	0,63 B
Média	0,65	0,76	0,66	0,74	0,74	0,66
CV (%)	2,32	2,26	2,54	2,50	3,51	6,80

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Com relação aos resultados de *solidity* do cultivar A, no tratamento 25 °C / 24h, não houve diferença significativa entre os lotes. No tratamento 20 °C / 30h os lotes A1, A2, A3, A4 e A7 evidenciaram melhor desempenho em relação aos demais lotes. Na condição a 20 °C / 48h os lotes A1 e A2 apresentaram melhor desempenho em relação aos lotes A4, A6, A7 e A8. No tratamento 25 °C / 30h os lotes A2 e A3 apresentaram melhor desempenho em relação aos demais lotes. Na condição a 30 °C / 24h os lotes A2 e A3 apresentaram melhor desempenho, o lote A1 evidenciou desempenho intermediário e os demais lotes com desempenho inferior. No tratamento 30 °C / 30h os lotes A1, A2 e A3 apresentaram desempenho superior em relação aos demais lotes (Tabela 33).

Para o cultivar B, no tratamento 20 °C / 30h, os lotes B1, B4, B5, B6, B7 e B10 apresentaram melhor desempenho em relação aos demais lotes. No tratamento 20 °C / 48h os lotes B1, B2, B4, B5, B6, B7, B8 e B10 evidenciaram menores valores e o lote B9 apresentou menor valor. Na condição a 25 °C / 24h os lotes B1, B4, B5, B6 e B10 apresentaram menores valores e os lotes B7, B8 e B9 apresentaram maiores valores. Na condição a 25 °C / 30h, os lotes B4 e B10 evidenciaram melhor desempenho e os lotes B2, B7, B8 e B9 apresentaram desempenho inferior. Na condição a 30 °C / 24h, o lote B4 apresentou menor valor, os lotes B2, B3, B7, B8 e B9 apresentaram maiores valores. No tratamento 30 °C / 30h os lotes B1, B4, B5, B8 e B10 apresentaram desempenho superior em relação aos demais lotes.

No geral, com base nos valores de *solidity* os lotes A2 e A3 apresentaram melhor desempenho em relação aos demais lotes do cultivar A. Com base nesta classificação foi constatada semelhança na discriminação dos lotes pelos testes convencionais de vigor como o teste de condutividade elétrica, todos os parâmetros fornecidos na análise Vigor-S, comprimento média de plântulas e comprimento de raiz na análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl. Em relação ao cultivar B, os lotes B4 e B9 apresentaram melhor e pior desempenho, respectivamente. Essa classificação foi observada nos testes nos testes de envelhecimento acelerado tradicional, condutividade elétrica, todos os parâmetros exceto o comprimento médio de plântulas na análise Vigor-S, todos os parâmetros avaliados na análise Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, nos tratamentos 20 °C / 30h e 25 °C / 24h da avaliação visual da porcentagem de plântulas com protrusão da raiz primária.

Portanto, foi constatada eficiência deste parâmetro na caracterização da protrusão da raiz primária. A *solitdity* é calculada pela razão entre a área do objeto e a área convexa que contém o objeto (Figura 3). Assim, uma semente embebida apresenta valor de *solidity* igual a 1 e, quanto maior o alongamento da raiz, o valor tende a ficar menor que 1, ou seja, há aumento da superfície convexa. Os demais parâmetros como *aspect ratio* e *roundness* podem apresentar variações na demarcação pelo *software* da elipse circunscrita na semente ou erros quando a plântula não está orientada com a raiz primária posicionada na vertical, sendo o *solidity* um parâmetro mais seguro para caracterizar a protrusão da raiz primária.

Tabela 33. Resultados de solidez (*solidity*) de sementes obtidos pelo *software* ImageJ após diferentes períodos e temperaturas de germinação, em nove lotes de sementes de soja, cultivar NS 7007 IPRO (cultivar A) e em dez lotes de sementes de soja, cultivar HO Jacutinga IPRO (cultivar B), na terceira época de avaliação.

	***Solidity*[2]**					
Lotes	**20 °C / 30h**	**20 °C / 48h**	**25 °C / 24h**	**25 °C / 30h**	**30 °C / 24h**	**30 °C / 30h**
			Cultivar A			
A1	0,96 A	0,85 A	0,96 A	0,92 B	0,92 B	0,82 A
A2	0,96 A	0,86 A	0,96 A	0,90 A	0,90 A	0,80 A
A3	0,96 A	0,87 B	0,96 A	0,89 A	0,91 A	0,79 A
A4	0,96 A	0,92 D	0,96 A	0,93 B	0,93 C	0,89 B
A5	0,97 B	0,91 C	0,96 A	0,94 B	0,94 C	0,89 B
A6	0,97 B	0,92 D	0,96 A	0,94 B	0,94 C	0,88 B
A7	0,96 A	0,93 D	0,96 A	0,93 B	0,94 C	0,90 B
A8	0,97 B	0,93 D	0,96 A	0,94 B	0,94 C	0,88 B
A9	0,97 B	0,91 C	0,96 A	0,94 B	0,94 C	0,90 B
Média	0,97	0,90	0,96	0,93	0,93	0,86
CV (%)	0,11	1,28	0,27	1,41	0,94	2,36
			Cultivar B			
B1	0,95 A	0,73 A	0,94 A	0,86 B	0,85 B	0,70 A
B2	0,96 B	0,76 A	0,95 B	0,89 C	0,88 C	0,76 B
B3	0,96 B	0,80 B	0,95 B	0,87 B	0,86 C	0,78 B
B4	0,95 A	0,77 A	0,93 A	0,83 A	0,68 A	0,68 A
B5	0,95 A	0,77 A	0,94 A	0,86 B	0,84 B	0,68 A
B6	0,95 A	0,75 A	0,94 A	0,86 B	0,84 B	0,74 B
B7	0,95 A	0,78 A	0,96 C	0,90 C	0,86 C	0,73 B
B8	0,96 B	0,79 A	0,96 C	0,89 C	0,87 C	0,72 A
B9	0,96 B	0,84 C	0,96 C	0,90 C	0,88 C	0,75 B
B10	0,95 A	0,77 A	0,93 A	0,85 A	0,83 B	0,70 A
Média	0,96	0,78	0,94	0,87	0,84	0,73
CV (%)	0,32	3,33	0,93	2,25	2,67	5,72

Letras maiúsculas: comparação de médias dentro de cada coluna (teste de Scott-Knott, $p \leq 0,05$). [2] Dados transformados em $(x+0,5)^{1/2}$.

Com base nos resultados dos parâmetros morfológicos obtidos pelo *software* ImageJ foi possível observar semelhança no ranqueamento dos lotes do cultivar A, sendo os lotes A4, A5, A6, A7, A8 e A9 apresentaram pior desempenho em relação aos demais lotes, essa classificação foi evidenciada nos tratamentos 25 °C / 30h, 30 °C / 24h e 30 °C / 30h do parâmetro circularidade (Tabela 30), todos os tratamentos avaliados fornecidos nas análises de *aspect ratio* e *roundness* (Tabelas 31 e 32) e nos tratamentos 25 °C / 30h, 30 °C / 24h e 30 °C / 30h do *solidity* (Tabela 33).

Para o cultivar B, os lotes B4 e B9 apresentaram melhor e pior desempenho, respectivamente. Os parâmetros que apresentaram sensibilidade para determinar essa classificação foram os tratamentos 20 °C / 48h, 25 °C / 24h, 25 °C / 30h, 30 °C / 24h e 30 °C / 30h para a circularidade, condições de

germinação a 25 °C / 24h e 25 °C / 30h avaliados pelo *aspect ratio* e *roundness* e todos os tratamentos avaliados pelo *solidity* e nos tratamentos 20 °C / 30h e 25 °C / 24h da avaliação visual da porcentagem de plântulas com protrusão da raiz primária.

Os parâmetros circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity* foram eficientes para caracterizar a protrusão da raiz primária em ambos os cultivares. Assim, os tratamentos 25 °C / 30h, 30 °C / 24h e 30 °C / 30h apresentaram as melhores condições para a protusão da raiz primária dos lotes do cultivar A, enquanto que para o cultivar B, melhor tratamento foi a 25 °C / 24h. Os parâmetros perímetro e área não foram seguros para caracterizar a protrusão da raiz primária, resultados que foram observados nas três épocas experimentais.

Considerando as três épocas experimentais, o tratamento 30 °C / 24h apresentou melhor desempenho na caracterização dos lotes do cultivar A. Em relação ao cultivar B, na primeira época experimental o tratamento que apresentou melhor eficiência foi o 20 °C / 30h e nas demais épocas o 25 °C / 24h apresentou melhor desempenho na avaliação da protrusão da raiz primária.

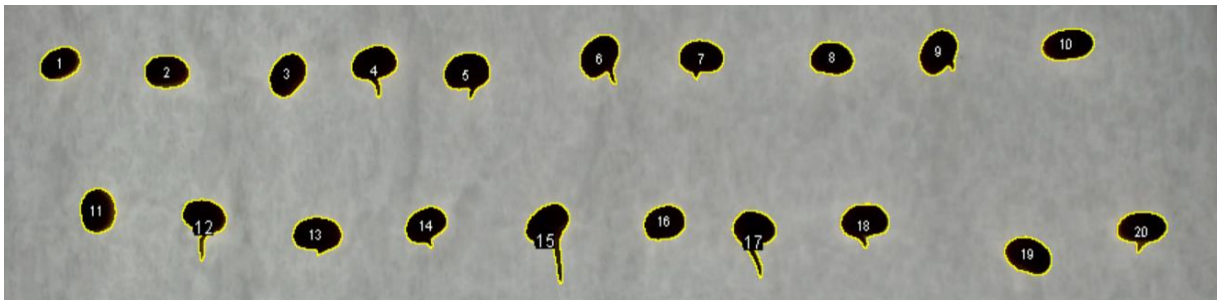
Os resultados da porcentagem da protrusão da raiz primária determinada a partir da análise visual apresentaram semelhante classificação dos lotes em relação aos resultados obtidos utilizando o *software* ImageJ, ou seja, houve a confirmação pelos testes de vigor tradicionais e parâmetros morfológicos (circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity*) nas três épocas experimentais. Entretanto, a utilização do *software* ImageJ apresentou menor subjetividade nas avaliações comparado com a análise visual, os dados gerados podem ser comparados entre si para associação com o vigor das sementes, e também, minimizar o tempo de análise.

Portanto, o *software* ImageJ pode ser utilizado na análise de vigor de sementes de soja para identificar a protrusão da raiz primária por meio de parâmetros morfológicos, uma vez que em relação à análise visual é um teste que apresenta menor tempo de avaliação, diminui a subjetividade do analista, e as imagens podem ser arquivadas para análise posteriormente. Segundo Dell'Aquila (2009), aplicações com desenvolvimento de tecnologias para imagens digitais usadas para germinação e testes de vigor em sementes, apresentam potencial para estudos no desempenho de sementes, a fim de combinar os métodos tradicionais com bases de dados biomorfológicos. Conforme o autor, parâmetros morfológicos e componentes de cor podem ser utilizados como marcadores do início da germinação.

5. ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE OS DESCRITORES MORFOLÓGICOS E A PROTRUSÃO DA RAIZ PRIMÁRIA

5.1. Aspectos relacionados à precisão dos descritores morfológicos na caracterização da protrusão da raiz primária pelo *software* ImageJ

A partir das discussões dos resultados dos parâmetros morfológicos das três épocas experimentais obtidas pelo *software* ImageJ observou-se diferenças na precisão dos parâmetros para caracterização da protrusão da raiz primária e sua associação com o vigor das sementes de soja. Como exemplo, na Figura 7 estão representadas as imagens de 20 sementes/plântulas e os respectivos resultados de área, perímetro, circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity*.



Sementes	Área	Perímetro	Circ.	AR	*Roundness*	*Solidity*
1	64,06	30,47	0,87	1,44	0,69	0,97
2	74,11	32,76	0,87	1,48	0,68	0,97
3	76,05	32,93	0,88	1,32	0,76	0,97
4	84,15	41,42	0,62	1,18	0,85	0,83
5	89,67	39,24	0,73	1,26	0,79	0,91
6	84,82	40,20	0,66	1,15	0,87	0,88
7	76,91	34,82	0,80	1,40	0,71	0,93
8	71,75	32,59	0,85	1,43	0,70	0,97
9	82,78	36,63	0,78	1,27	0,79	0,93
10	80,99	35,81	0,79	1,84	0,54	0,97
11	78,03	33,16	0,89	1,17	0,85	0,97
12	81,51	45,04	0,50	1,10	0,91	0,76
13	84,47	36,67	0,79	1,53	0,66	0,95
14	71,81	34,36	0,76	1,35	0,74	0,91
15	93,24	55,75	0,38	1,45	0,69	0,68
16	71,91	32,44	0,86	1,35	0,74	0,97
17	85,68	50,17	0,43	1,26	0,79	0,75
18	86,10	39,03	0,71	1,38	0,73	0,90
19	84,15	35,33	0,85	1,50	0,67	0,97
20	82,27	37,76	0,72	1,55	0,64	0,90

Figura 7. Parâmetros morfológicos relacionados à área, perímetro, circularidade, relação de aspecto (*aspect ratio*), redondeza (*roundness*) e solidez (*solidity*) de sementes de um mesmo lote do cultivar A após o tratamento 20 °C / 30h.

Observa-se que as sementes 1 e 19 não apresentaram protrusão da raiz primária, porém. apresentaram discrepância nos resultados de área (64,06 e 84,15 mm^2) e perímetro (30,47 e 35,33 mm). No caso da semente 4, que apresentou protusão da raiz primária, o valor de área foi o mesmo da semente 19. Já para a semente 12, que também apresentou protrusão da raiz primária, o valor de área foi menor que o observado para a semente 19. Esses exemplos ajudam a explicar a baixa consistência das informações de perímetro e área observadas nas três épocas experimentais para discriminação dos lotes de sementes quanto ao vigor com base na caracterização da raiz primária.

Com relação à circularidade constata-se que valores inferiores a 0,70 estão relacionados com a protrusão da raiz primária. Entretanto, este parâmetro não apresentou segurança para caracterizar a protrusão quando a raiz era muito pequena. Por exemplo, nas sementes 9 e 10, que apresentaram valores de 0,78 e 0,79, respectivamente, apenas a semente 9 teve a protrusão da raiz primária.

Em relação aos parâmetros de *aspect ratio* e *roundness* observou-se que dependendo do formato da semente há diferença nos resultados. Por exemplo, as sementes 10 e 11 com formato alongado e circular, respectivamente, não apresentaram a protrusão da raiz primária e os valores de *aspect ratio* foram de 1,84 para a semente 10 e 1,10 para a semente 11 e os valores de *roundness* foram de 0,54 e 0,85 para as sementes 10 e 11, respectivamente. Outro fator que pode ter influenciado na consistência dos resultados para caracterização da protrusão da raiz primária é o modo de realização dos cálculos pelo *software* ImageJ com base na definição da elipse que circunscreve a semente para realização do cálculo do *aspect ratio*. Observa-se as sementes 12 e 15, por exemplo, que a apresentaram raiz primária com tamanho semelhante tiveram diferenças nos valores de *aspect ratio,* ou seja, valores de 1,10 e 1,45, respectivamente. Observa-se ainda que sementes que não emitiram a raiz primária apresentaram valor de *aspect ratio* maior que o valor observado para a semente 12, como as sementes 1, 2, 3, 8 e 10.

Com relação ao parâmetro *solidity* observa-se consistência dos resultados em associação com a protrusão da raiz primária. Sementes que emitiram a raiz primária possuem menor valor de *solidity* em relação às sementes que não emitiriam. Observa-se que todas as sementes que não emitiram a raiz primária, ou seja, as sementes 1, 2, 3, 8, 10, 11, 16 e 19, apresentaram o mesmo valor de *solidty*, independentemente do formato da semente embebida. Porém, quando o tamanho da raiz primária é muito pequeno (inferior a 1 mm) a sensibilidade diminui, como exemplificado na semente 13 que apresentou protrusão da raiz primária e valor de *solidity* de 0,95 em comparação com a semente 1 que não apresentou protrusão de raiz primária com valor de 0,97. Dentre os parâmetros morfológicos avaliados o *solidity* foi o mais consistente para a caracterização da protrusão da raiz primária.

5.2. Correlação entre as avaliações de potencial fisiológico e atributos morfológicos visando a caracterização da protrusão da raiz primária correspondentes às três épocas experimentais

Nas Figuras 8 a 13 estão apresentados os gráficos biplot da análise de componentes principais para cada cultivar e tratamento de temperatura e período de germinação das três épocas experimentais, mostrando a correlação entre os dados da avaliação do potencial fisiológico e atributos morfológicos de

perímetro, área, circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity* obtidos pelo software ImageJ e avaliados na caracterização da protrusão da raiz primária.

Para o cultivar A, o componente principal PC1 explicou mais de 80% da variação entre lotes nos diferentes tratamentos de temperatura e período de germinação. Os lotes A1, A2 e A3, que eram os mais vigororos, foram posicionados do mesmo lado dos vetores correspondentes aos testes de germinação, primeira contagem de germinação, envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl, vigor e viabilidade avaliados pelo teste de tetrazólio, parâmetros avaliados na análise Vigor-S e emergência da raiz primária e *roundness*, em todos os tratamentos avaliados, exceto no tratamento 20 °C / 30h e 30 °C / 30h. Observa-se que o vetor correspondente à emergência da raiz primária avaliada visualmente se posicionou do mesmo lado do vetor *roundness*, evidenciando que o aumento do valor deste parâmetro está associado à protrusão da raiz primária. O mesmo raciocínio se aplica ao *aspect ratio* e *solidity*, indicando que a diminuição do valor desses parâmetros está associada à protrusão da raiz primária, pois estão em posição oposta em relação à protusão da raiz primária. A análise biplot também foi importante para evidenciar que os parâmetros de perímetro e área não apresentaram correlação com as avaliações de potencial fisiológico, visto que se posicionaram mais verticalmente no plano.

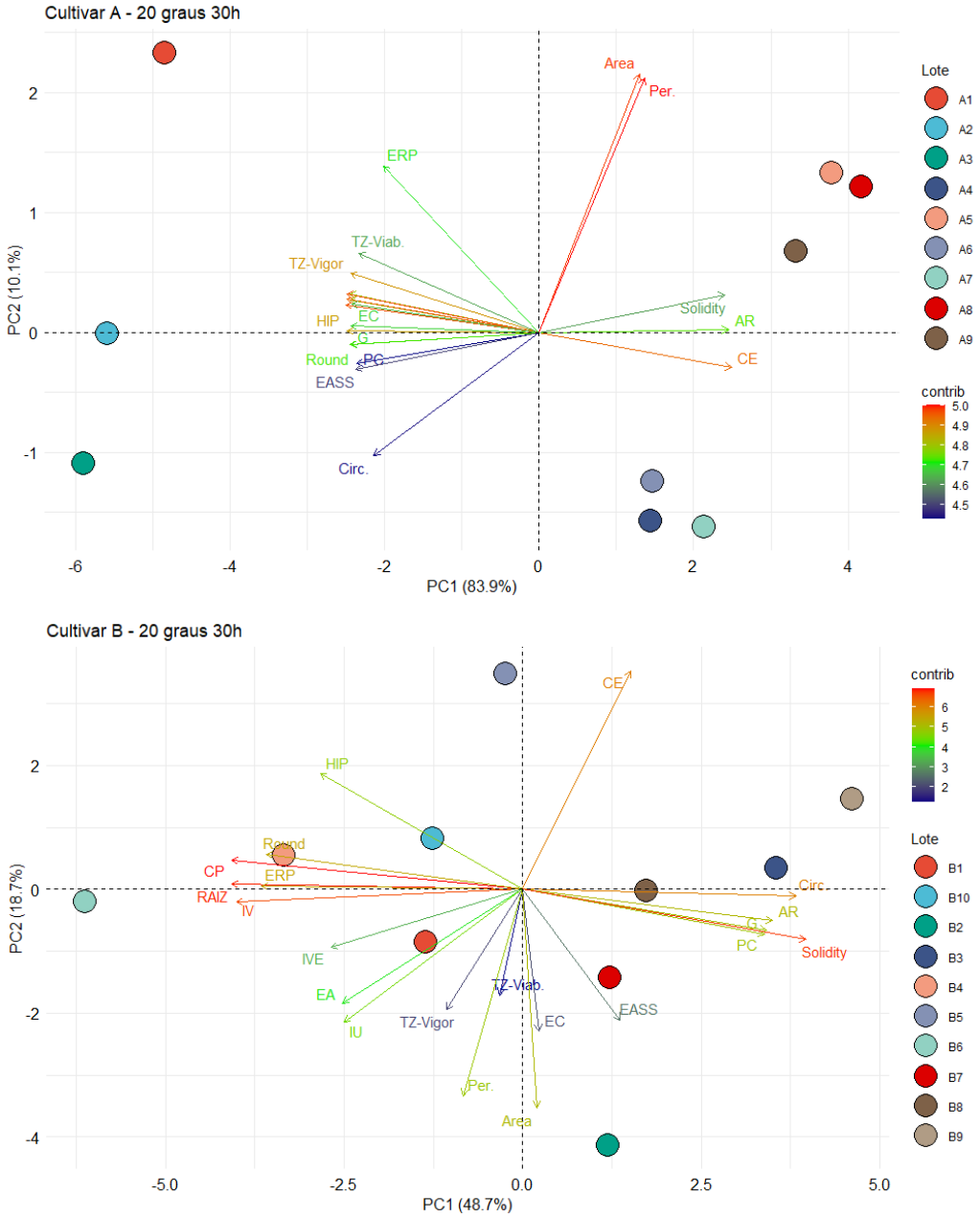


Figura 8. Gráficos biplot da análise de componentes principais entre as avaliações de potencial fisiológico e atributos morfológicos obtidos pelo software ImageJ visando a caracterização de protrusão da raiz primária de sementes de soja do cultivar A (NS 7007 IPRO) e B (HO Jacutinga IPRO) no tratamento a 20 °C / 30h, correspondentes às três epocas experimentais. GER: germinação, PC: primeira contagem de germinação, EA: envelhecimento acelerado, EASS: envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, CE: condutividade elétrica, TZ-Vigor: vigor pelo teste de tetrazólio, TZ-Viab: viabilidade pelo teste de tetrazólio, EC: emergência de plântulas em campo, IVE: índice de velocidade de emergência de plântulas, CH: comprimento de hipocótilo, CR: comprimento da raiz, CP: comprimento de plântulas, IV: índice de vigor, IU: índice de uniformidade de desenvolvimento de plântulas, ERP: emergência da raiz primária, Área: área da semente, Per: perímetro da semente, Circ: circularidade, AR: *aspect ratio*, Round: *roundness* e Solidity: *solidity*.

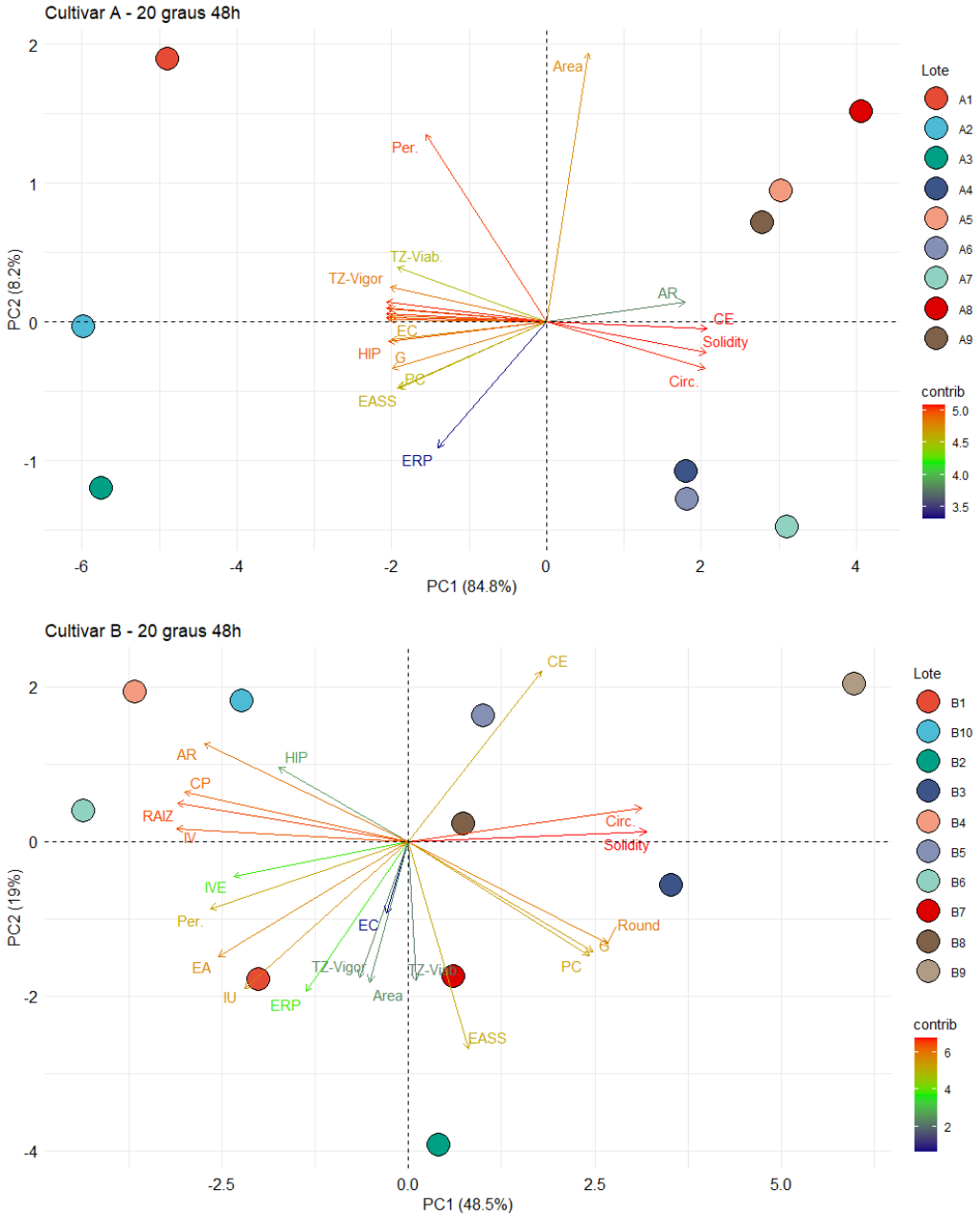


Figura 9. Gráficos biplot da análise de componentes principais entre as avaliações de potencial fisiológico e atributos morfológicos obtidos pelo software ImageJ visando a caracterização de protrusão da raiz primária de sementes de soja do cultivar A (NS 7007 IPRO) e B (HO Jacutinga IPRO) no tratamento a 20 °C / 48h, correspondentes às três epocas experimentais. GER: germinação, PC: primeira contagem de germinação, EA: envelhecimento acelerado, EASS: envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, CE: condutividade elétrica, TZ-Vigor: vigor pelo teste de tetrazólio, TZ-Viab: viabilidade pelo teste de tetrazólio, EC: emergência de plântulas em campo, IVE: índice de velocidade de emergência de plântulas, CH: comprimento de hipocótilo, CR: comprimento da raiz, CP: comprimento de plântulas, IV: índice de vigor, IU: índice de uniformidade de desenvolvimento de plântulas, ERP: emergência da raiz primária, Área: área da semente, Per: perímetro da semente, Circ: circularidade, AR: *aspect ratio*, Round: *roundness* e Solidity: *solidity*.

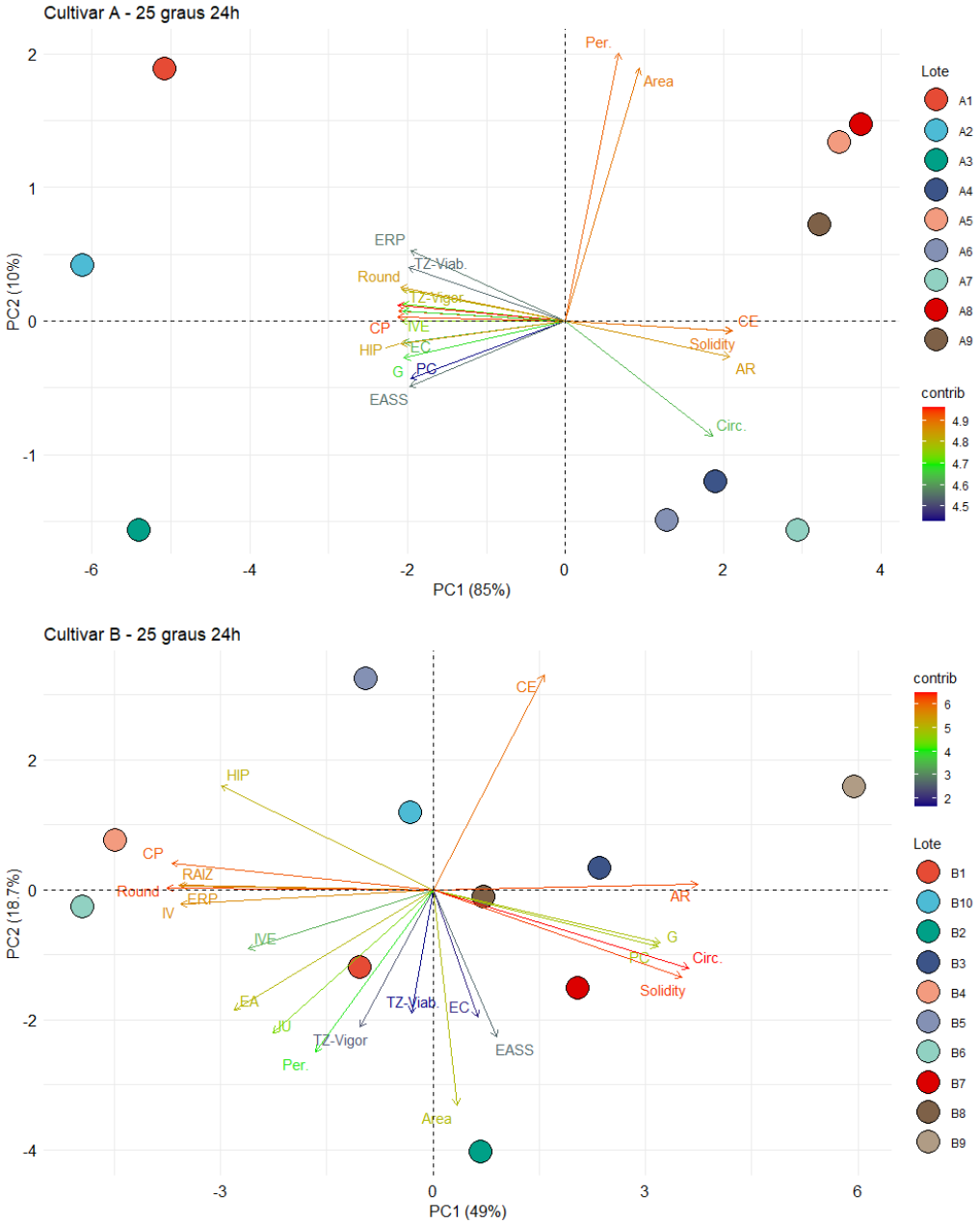


Figura 10. Gráficos biplot da análise de componentes principais entre as avaliações de potencial fisiológico e atributos morfológicos obtidos pelo software ImageJ visando a caracterização de protrusão da raiz primária de sementes de soja do cultivar A (NS 7007 IPRO) e B (HO Jacutinga IPRO) no tratamento a 25 °C / 24h, correspondentes às três epocas experimentais. GER: germinação, PC: primeira contagem de germinação, EA: envelhecimento acelerado, EASS: envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, CE: condutividade elétrica, TZ-Vigor: vigor pelo teste de tetrazólio, TZ-Viab: viabilidade pelo teste de tetrazólio, EC: emergência de plântulas em campo, IVE: índice de velocidade de emergência de plântulas, CH: comprimento de hipocótilo, CR: comprimento da raiz, CP: comprimento de plântulas, IV: índice de vigor, IU: índice de uniformidade de desenvolvimento de plântulas, ERP: emergência da raiz primária, Área: área da semente, Per: perímetro da semente, Circ: circularidade, AR: *aspect ratio*, Round: *roundness* e Solidity: *solidity*.

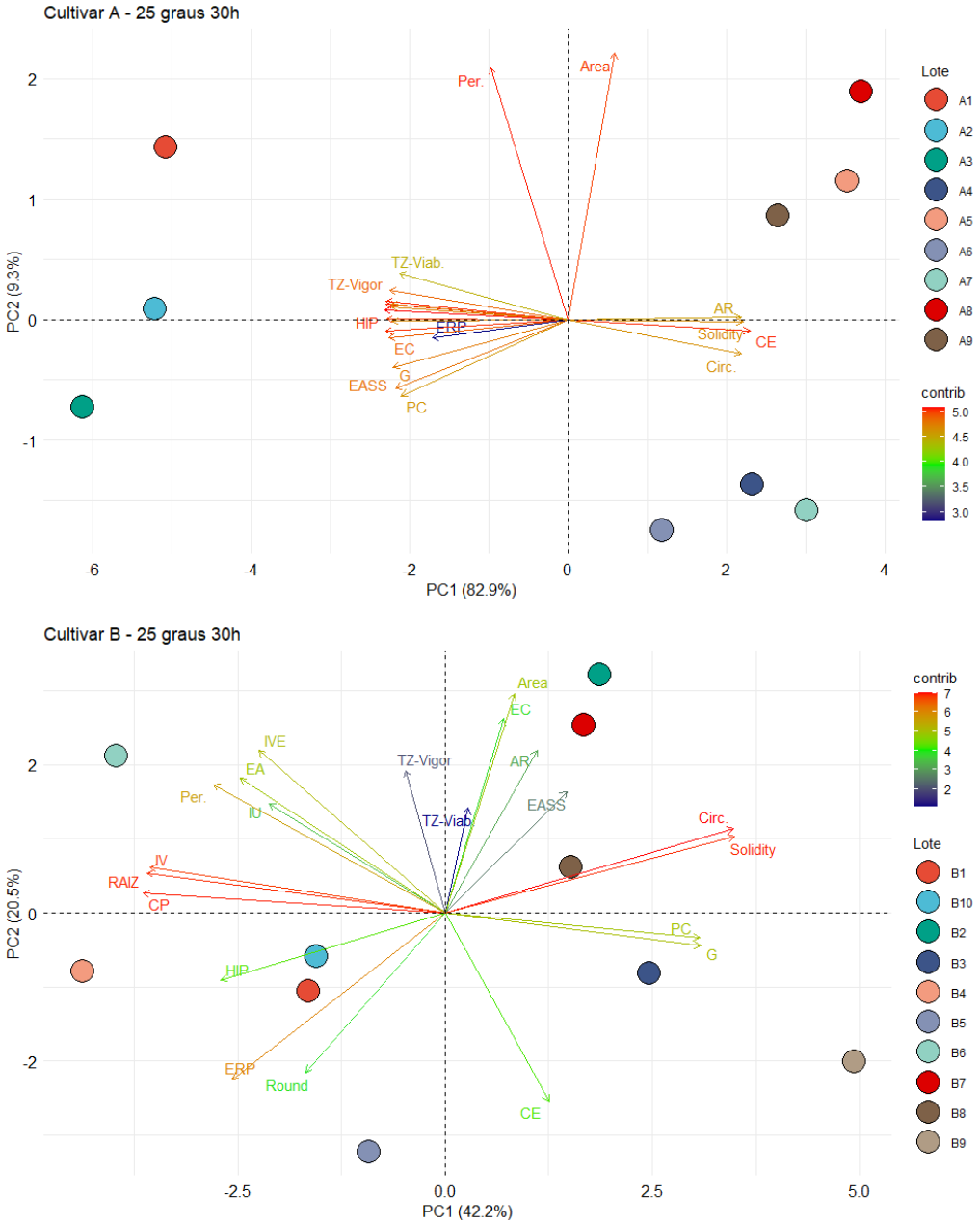


Figura 11. Gráficos biplot da análise de componentes principais entre as avaliações de potencial fisiológico e atributos morfológicos obtidos pelo software ImageJ visando a caracterização de protrusão da raiz primária de sementes de soja do cultivar A (NS 7007 IPRO) e B (HO Jacutinga IPRO) no tratamento a 25 °C / 30h, correspondentes às três epocas experimentais. GER: germinação, PC: primeira contagem de germinação, EA: envelhecimento acelerado, EASS: envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, CE: condutividade elétrica, TZ-Vigor: vigor pelo teste de tetrazólio, TZ-Viab: viabilidade pelo teste de tetrazólio, EC: emergência de plântulas em campo, IVE: índice de velocidade de emergência de plântulas, CH: comprimento de hipocótilo, CR: comprimento da raiz, CP: comprimento de plântulas, IV: índice de vigor, IU: índice de uniformidade de desenvolvimento de plântulas, ERP: emergência da raiz primária, Área: área da semente, Per: perímetro da semente, Circ: circularidade, AR: *aspect ratio*, Round: *roundness* e Solidity: *solidity*.

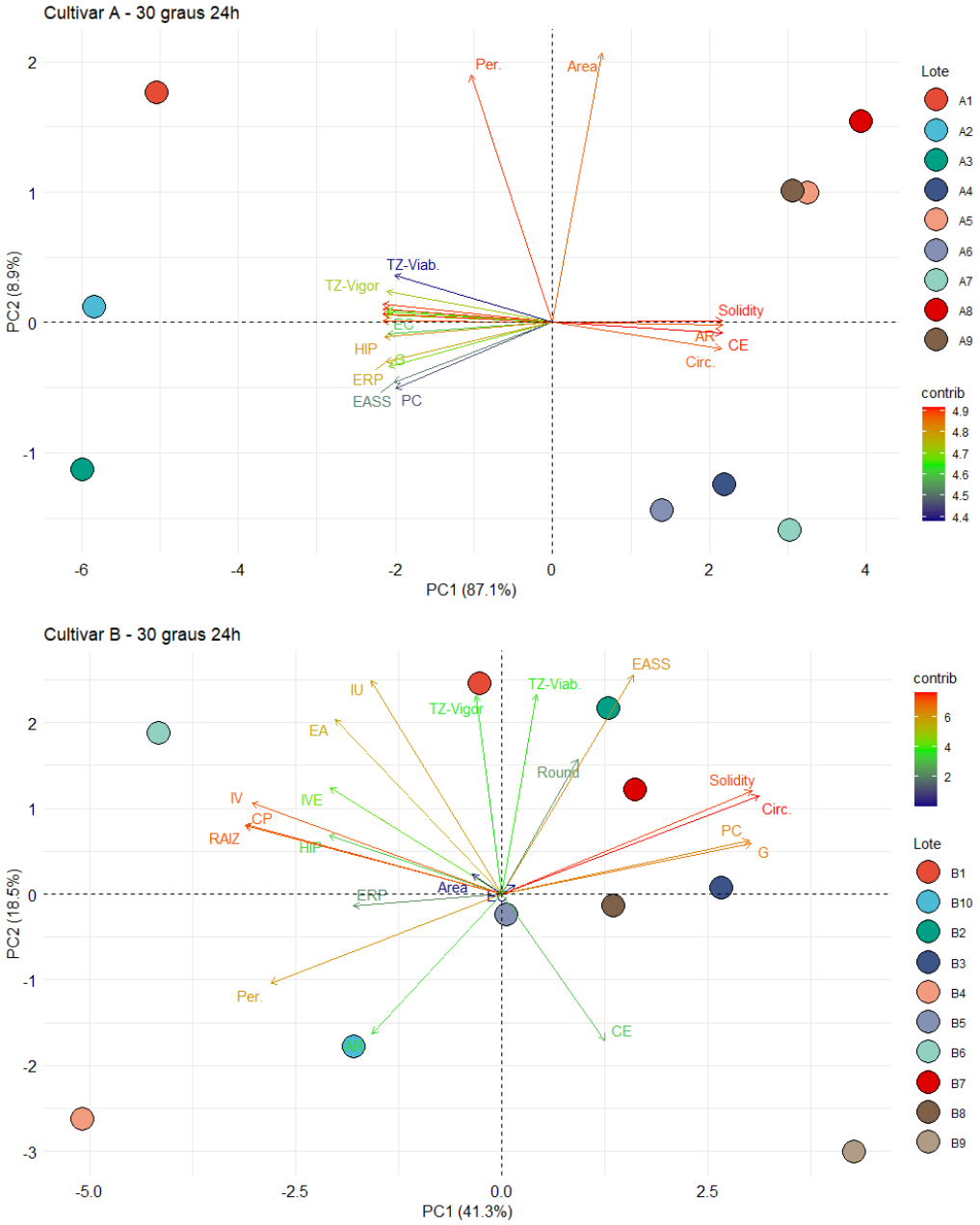


Figura 12. Gráficos biplot da análise de componentes principais entre as avaliações de potencial fisiológico e atributos morfológicos obtidos pelo software ImageJ visando a caracterização de protrusão da raiz primária de sementes de soja do cultivar A (NS 7007 IPRO) e B (HO Jacutinga IPRO) no tratamento a 30 °C / 24h, correspondentes às três epocas experimentais. GER: germinação, PC: primeira contagem de germinação, EA: envelhecimento acelerado, EASS: envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, CE: condutividade elétrica, TZ-Vigor: vigor pelo teste de tetrazólio, TZ-Viab: viabilidade pelo teste de tetrazólio, EC: emergência de plântulas em campo, IVE: índice de velocidade de emergência de plântulas, CH: comprimento de hipocótilo, CR: comprimento da raiz, CP: comprimento de plântulas, IV: índice de vigor, IU: índice de uniformidade de desenvolvimento de plântulas, ERP: emergência da raiz primária, Área: área da semente, Per: perímetro da semente, Circ: circularidade, AR: *aspect ratio*, Round: *roundness* e Solidity: *solidity*.

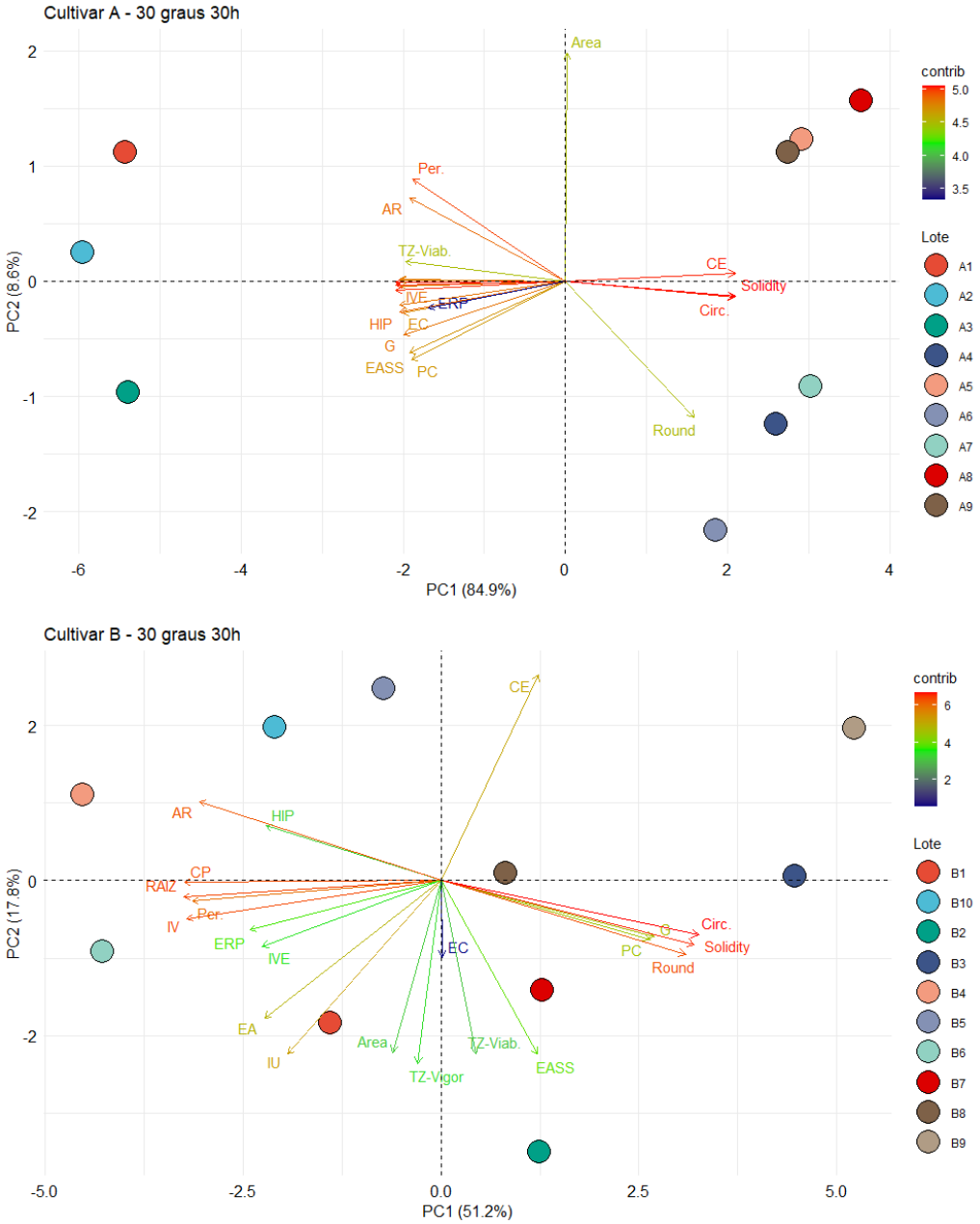


Figura 13. Gráficos biplot da análise de componentes principais entre as avaliações de potencial fisiológico e atributos morfológicos obtidos pelo software ImageJ visando a caracterização de protrusão da raiz primária de sementes de soja do cultivar A (NS 7007 IPRO) e B (HO Jacutinga IPRO) no tratamento a 30 °C / 30h, correspondentes às três epocas experimentais. GER: germinação, PC: primeira contagem de germinação, EA: envelhecimento acelerado, EASS: envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl, CE: condutividade elétrica, TZ-Vigor: vigor pelo teste de tetrazólio, TZ-Viab: viabilidade pelo teste de tetrazólio, EC: emergência de plântulas em campo, IVE: índice de velocidade de emergência de plântulas, CH: comprimento de hipocótilo, CR: comprimento da raiz, CP: comprimento de plântulas, IV: índice de vigor, IU: índice de uniformidade de desenvolvimento de plântulas, ERP: emergência da raiz primária, Área: área da semente, Per: perímetro da semente, Circ: circularidade, AR: *aspect ratio*, Round: *roundness* e Solidity: *solidity*.

Em relação ao cultivar B, os lotes apresentaram variações estreitas no potencial fisiológico, conforme foi discutido anteriormente dentro de cada época experimental. Assim, os gráficos biplot revelaram maior dispersão dos dados em comparação com os lotes do cultivar A, que apresentaram um padrão na separação espacial dos lotes mais e menos vigorosos.

No tratamento 20 °C / 30h correspondente ao cultivar B (Figura 8) observa-se que o componente PC1 explicou 48,7% e o componente PC2 18,7% da variabilidade dos dados, totalizando 67,4%. Os lotes B6 e B4 que apresentaram maior potencial fisiológico, se posicionaram nos gráficos do mesmo lado dos vetores correspondentes aos testes envelhecimento acelerado tradicional, índice de velocidade de emergência, vigor avaliado pelo teste de tetrazólio, parâmetros fornecidos pela análise Vigor-S, emergência da raiz primária e *roundness*. Para os demais tratamentos de 20 °C / 48h, 25 °C / 24h e 30 °C / 30h (Figuras 9, 10 e 13), os componentes PC1 apresentaram próximos de 50% e os componentes PC2 próximo de 18%. Os gráficos apresentaram semelhança quanto à orientação dos lotes, sendo que os lotes B4 e B6 apresentaram maior proximidade com as avaliações fornecidas pelo Vigor-S, exceto para o índice de uniformidade, e o parâmetro *aspect ratio.* O lote B9 apresentou maior proximidade com o teste de condutividade elétrica, indicando que as sementes desse lote apresentavam potencial fisiológico mais baixo.

No tratamento 25 °C / 30h do cultivar B, o PC1 explicou 42,2% e PC2 de 20,5% da variabilidade dos dados entre lotes, apresentando um total de 62,7%. Os lotes B4 e B6 que apresentaram maior potencial fisiológico, se posicionaram próximo dos vetores correspondentes ao teste de envelhecimento acelerado tradicional, vigor avaliado pelo teste de tetrazólio, índice de velocidade de emergência, análises fornecidas pelo Vigor-S, parâmetros morfológicos de perímetro e *roundness*. No tratamento 30 °C / 24h o componente PC1 explicou 41,3% e o PC2 18,5% da variabilidade dos dados, totalizando 59,8%. Verificou-se que o lote B9 apresentou proximidades com o teste de condutividade elétrica, e os lotes B1, B2, B4 e B6 apresentaram proximidades com as análises fornecidas pelo Vigor-S, teste de envelhecimento acelerado tradicional, índice de velocidade de emergência, vigor avaliado pelo teste de tetrazólio, emergência da raiz primária, e o parâmetro de relação de aspecto. Os resultados de correlação mostraram que o parâmetro área não apresentou correlação com quaisquer outros testes avaliados.

Dessa forma, os parâmetros morfológicos obtidos pelo *software* ImageJ permitiram identificar a protrusão da raiz primária e associar com o vigor de sementes de soja, correlacionando com os demais testes já realizados, permitindo uma avaliação mais rápida e menos subjetiva quando comparada com a análise visual da porcentagem de plântulas com protrusão da raiz primária. Škrubej *et al.* (2015) verificaram que o sistema computacional baseado no processamento de imagens é capaz de mensurar com acurácia de 95,44% da germinação das sementes de tomate, com potencial para integrar-se às avaliações de laboratório realizadas tradicionalmente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base os resultados das três épocas experimentais para ambos os cultivares, verificou-se eficiência das análises Vigor-S obtidas após o teste de envelhecimento acelerado tradicional (41 °C / 48 h) e com solução saturada de NaCl (41 °C / 72 h), permitindo a discriminação dos lotes de sementes quanto ao vigor de maneira semelhante aos testes tradicionalmente utilizados para avaliação do vigor de sementes de soja. Ressalta-se que nas análises Vigor-S após o teste de envelhecimento acelerado com solução saturada de NaCl foi observada e menor variabilidade do grau de umidade entre as amostras após o período de exposição das sementes ao teste de envelhecimento, assegurando maior confiabilidade dos resultados obtidos.

Assim, o Sistema Análise Automatizada do Vigor de Sementes (Vigor-S) na análise de plântulas obtidas após o teste de envelhecimento acelerado pode ser utilizado como alternativa nos programas de controle de qualidade de sementes. Um ponto importante é o tempo reduzido para a correção de imperfeições após as análises pelo *software*, pois as plântulas originadas de sementes submetidas ao teste são menores que as normalmente obtidas para a análise Vigor-S tradicional, o que resultou em menor necessidade de correções com auxílio do mouse, pois o sistema apresentou maior precisão na demarcação das plântulas. Dessa forma, a análise após o teste de envelhecimento acelerado tradicional e com solução saturada de NaCl é promissora, visando obter resultados com elevada rapidez e precisão. Essa análise constitui-se como um complemento das informações obtidas no teste de envelhecimento acelerado em relação a porcentagem de plântulas normais, além de reduzir em um dia o período de avaliação.

Com relação à caracterização da protrusão da raiz primária, os parâmetros morfológicos de circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity* obtidos pelo software ImageJ foram os mais eficientes e apresentam correlações com os testes de vigor tradicionais para ambos os cultivares. Com base nos resultados obtidos nas três épocas experimentais e nos gráficos biplot da análise de componentes principais verificou-se que o tratamento 30 °C / 24h foi o mais adequado para caracterizar a protrusão do cultivar A, enquanto que para o cultivar B, os tratamentos mais adequados foram 20 °C / 30h e 25 °C / 24h. Os parâmetros de perímetro e área não apresentaram segurança para caracterizar a protrusão da raiz primária, não apresentando correlação com os demais testes utilizados para avaliação do vigor das sementes.

Assim, houve a confirmação dos resultados pelos testes de vigor tradicionais e os demais testes, indicando uma relação direta entre os parâmetros obtidos pelo *software* ImageJ com a porcentagem da protrusão da raiz primária determinada a partir da análise visual e sua associação com o vigor das sementes.

7. CONCLUSÕES

A análise Vigor-S a partir de plântulas originadas após o teste de envelhecimento acelerado (procedimento tradicional ou com solução saturada de NaCl) é eficiente para determinar o vigor de lotes de sementes de soja.

Os parâmetros morfológicos de circularidade, *aspect ratio*, *roundness* e *solidity* obtidos pelo *software* ImageJ são eficientes para caracterizar a protrusão da raiz primária e auxiliar na discriminação de lotes de sementes de soja quanto ao vigor.

As combinações de temperatura e tempo de germinação recomendadas para a determinação da protrusão da raiz primária e discriminação dos lotes quanto ao vigor são 20 °C / 30h e 25 °C / 24h e 30 °C / 24h.

Os parâmetros de perímetro e área não são eficientes para caracterizar a protrusão da raiz primária de sementes de soja.

REFERÊNCIAS

ABUD, H. F., MESQUITA, C. M. D. S., SARMENTO, E. C. S., MELO, R. D. S., LIMA, K. A. P. D., SILVA, A. K. F. D. Image analysis of the seeds and seedlings of Vigna radiata L. **Revista Ciência Agronômica**, v. 53, 2022.

ALVARENGA, R. O.; MARCOS-FILHO, J.; TIMOTEO, T. S. Assessment of the physiological potential of super sweet corn seeds. **Journal of Seed Science**, v.35, n.3, p.340-346, 2013.

AZEREDO, G. A.; DE PAULA, R. C.; VALERI, S. V. Temperatura e substrato para a germinação de sementes de Piptadenia moniliformis Benth. **Scientia Forestalis**, p. 479-488, 2011.

BAALBAKI, R.; ELIAS, S.; MARCOS-FILHO, J.; McDONALD, M. B. Seed vigor testing handbook: contribution n. 32 to **The handbook on seed testing**. 345p., 2009.

BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T. Produção de Sementes. In: PESKE, S. T.; LUCCA, O. F.; BARROS, A. C. S. A. **Sementes: Fundamentos científicos e tecnológicos**. 2. ed. Pelotas: UFPEL, v. 2, p. 470-498, 2006.

BASE DE DADOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA ÁREA DE AGROMETEOROLOGIA - LEB - ESALQ - USP - Piracicaba, SP, 2021.

BASSEL, G. W. To grow or not to grow. **Trends in Plant Science,** v. 21, n.6, p. 498–505, 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa n° 45de 17 de setembro de 2013. Estabelece os padrões de identidade e qualidade para a produção e a comercialização de sementes. Diário Oficial da União, n. 181, seção 1, p. 16-37, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes.** Brasília: Mapa/ACS, 399p, 2009.

CARVALHO, M. L. M. Utilização de análise de imagem: conceitos, metodologias e usos. **Informativo ABRATES**, Londrina, v.20, n.3, p.45-47, 2010.

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 4.ed. Jaboticabal: FUNEP, 588p, 2000.

CASTAN, D. O. C; GOMES-JUNIOR, F.G; MARCOS-FILHO, J; Vigor-S, a new system for evaluating the physiological potential of maize seeds. **Scientia Agricola**, v.75, n.2, p.167-172, 2018.

CASTRO, P. R. C., ARCHILA, A., AGUIAR, F. F. A., ALMEIDA, M. D. Efeito da temperatura na germinação de sementes de vigna, feijoeiro e soja. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz** [online] v. 40, n. 1, pp. 575-583, 1983. [Acessado 25 novembro 2021]. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0071-12761983000100031>.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro – grãos: Levantamento, maio 2021 – safra 2020/2021. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento.

COSTA, J. A.; MARCHEZAN, E. **Características dos estádios de desenvolvimento da soja.** Campinas: Fundação Cargill, 1982. 30 p.

COSTA, N. P. da; FRANÇA NETO, J.B.; KRZYZANOWSKI, F.C.; HENNING, A.A.; PEREIRA, J.E. Avaliação de metodologia alternativa para o teste de tetrazólio para sementes de soja. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. 2, p. 305-312, 1998.

COSTA, N. P.; MARCOS FILHO, J. Temperatura e pré-condicionamento de sementes de soja para o teste de tetrazólio. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.51, n.1, p.158-168, 1994.

DELL'AQUILA, A., van ECK, J.W.; van der HEIJDEN, G.W.A.M. The application of image analysis in monitoring the imbibition process of White cabbage (*Brassica oleracica* L.) seeds. **Seed Science Research**, v.10, p.163-169, 2000.

DELL'AQUILA, A. Application of a computer-aided image analysis system to evaluate seed germination under different environmental conditions, **Italian Journal of Agronomy**, v.8, n.1, p. 51-62, 2004b.

DELL'AQUILA, A. Cabbage, lentil, pepper, and tomato seed germination monitored by an image analysis system. **Seed Science and Technology**, v.32, p. 225-229, 2004a.

DELL'AQUILA, A. Development of novel techniques in conditioning, testing and sorting seed physiological quality. **Seed Science and Technology**, v.37, n.3, p.608-624, 2009.

DELL'AQUILA, A. Digital imaging information technology applied to seed germination testing. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.29, n.1, p. 213-221, 2009.

DEMIR, I.; ERMIS, S.; MAVI, K.; MATTTHEWS, S. Mean germination time of pepper seed lots (*Capsicum annuum* L.) predicts size and uniformity of seedlings in germination tests and transplant modules. **Seed Science and Technology**, v. 36, n. 1, p. 21-30, 2008.

DIAS, M. A. N.; MONDO, V. H. V.; CICERO, S. M.; GONÇALVES, N. R.; SILVA, C. A. T. D. Vigor tests association as an alternative for precise and efficient assessment of maize seed quality. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 3, p. 93-99, 2015.

DUTRA, A. S.; VIEIRA, R. D. Envelhecimento acelerado como teste de vigor para sementes de milho e soja. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 715-721, 2004.

ERMIS, S.; OZDEN, E.; DEMIR, I. Early radicle emergence count after controlled deterioration (CD) predicts emergence potential better than standard germination after CD in tomato varieties. **Seed Science and Technology**, v. 43, n.2, p. 278-283, 2015.

FRANÇA-NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C. Teste de envelhecimento acelerado. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R.D.; FRANÇA NETO, J.B, MARCOS FILHO, J. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes.** Londrina: ABRATES, 2020.601 p.

GENEVE, R. L.; KESTER, S. T. Evaluation of seedling size following germination using computer-aided analysis of digital images from a flat-bed scanner. **HortScience**, v. 36, n. 6, p. 1117-1120, 2001.

GOMES, M.; PRADO, J.; KRZYZANOWSKI, F.; FRANÇA-NETO, J. B.; HENNING, F.; HENNING, A.; LORINI, I. Emissão de radícula na avaliação do vigor de sementes de soja. **In: Congresso Brasileiro de Soja**, 8. 2018, Goiânia. Inovação, tecnologias digitais e sustentabilidade da soja: anais. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

GOMES-JUNIOR, F. G. Análise computadorizada de imagens de plântulas. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R.D.; FANÇA NETO, J.B.; MARCOS-FILHO, J. (Eds.). **Vigor de sementes: conceitos e testes.** Londrina: ABRATES, 601p. Cap.3, p.142-183, 2020.

GOMES-JUNIOR, F. G; CHAMMA. H. M. C. P.; CICERO, S. M.; Automated image analysis of seedling for vigor evaluation of common bean seeds. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.36, n.2, p.195-200, 2014.

GRIESHOP, C. M.; FAHEY, G. C. Comparison of quality characteristics of soybeans from Brazil, China, and the United States. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 49, p. 2669-2673, 2001.

HOFFMASTER A. L; FUJIMURA K.; McDONALD M. B.; BENNETT M. A. An automated system for vigour testing three-day-old soybean seedlings. **Seed Science and Technology**, v.31:701-713, 2003.

International Seed Testing Association – ISTA. **International Rules for Seed Testing.** Bassesrdorf, ISTA. 2020. 300p.

JIANHUA, Z.; McDONALD, M.B. The saturated salt accelerated aging test for small-seeded crops. **Seed Science and Technology**, v.25, n.1, p.123-131, 1997.

KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA NETO, J. B.; GOMES JÚNIOR, F, G.; NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados em desempenho de plântulas. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B.; MARCOS FILHO, J. **Vigor de sementes: Conceitos e testes.** Associação Brasileira de Tecnologia de Sementes. Londrina-PR, ABRATES, p.79-140, 2020.

LEITE, M. D. S., TORRES, S. B., GOMES JUNIOR, F. G., REGO, C. H. Q., PAIVA, E. P. D., LEITE, T. D. S. Viabilidade da análise de imagens de plântulas (Vigor-S) na determinação do potencial fisiológico de sementes de melão. **Journal of Seed Science**, v. 42, 2020.

LOPES, R. R.; FRANKE, L. B.; NUNES, F. S. Metodologia alternativa do teste de envelhecimento acelerado para as sementes de azevém. **Scientia Agrária**, v.10, n. 2, p. 89-94, 2009.

MAGUIRE, J. D. Speed of germination aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigour. **Crop Science**, v.2, p.176-177, 1962.

MARCHI, J. L.; CICERO, S. M.; GOMES-JUNIOR, F. G. Utilização da análise computadorizada de plântulas na avaliação do potencial fisiológico de sementes de amendoim tratadas com fungicidas e inseticidas. **Revista Brasileira de Sementes**, v.33, n.4, p.652-662, 2011.

MARCOS FILHO, J. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. **Scientia Agricola**, v.72, n.4, p. 363-374, 2015b.

MARCOS FILHO, J. Teste de envelhecimento acelerado. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R.D.; FRANÇA NETO, J. B, MARCOS FILHO, J. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes.** Londrina: ABRATES, 2020.601 p.

MARCOS FILHO, J.; KIKUTI, A. L. P.; LIMA, L. B. de. Métodos para avaliação do vigor de sementes de soja, incluindo a análise computadorizada de imagens. **Revista Brasileira de sementes**, v. 31, n.1, p.102-112, 2009.

MARCOS FILHO, J.; NOVEMBRE, A. D. C.; CHAMMA, H. M. C. P. Tamanho da semente e o teste de envelhecimento acelerado para soja. **Scientia Agricola**, v. 57, p. 473-482, 2000.

MARCOS-FILHO, J. Fisiologia de sementes de plantas cultivadas, ABRATES, Londrina, ed.2,. 2015a, p.659.

MARCOS-FILHO, J. NOVEMBRE, A. D. C.; CHAMMA, H. M. C. P. Teste de envelhecimento acelerado e de deterioração controlada para avaliação do vigor de sementes de soja. **Scientia Agricola**, v.58, n.2, p.421-426, 2001.

MARTINELLI-SENEME, A.; MARTINS, C. C.; CASTRO, M. M.; NAKAGAWA, J.; CAVARIANI, C. Avaliação do vigor de sementes peliculizadas de tomate. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 26, n. 2, p. 1-6, 2004.

MARTINS, C. C.; MARTINELLI-SENEME, A.; CASTRO, M. M.; NAKAGAWA, J.; CAVARIANI, C. Comparação entre métodos para a avaliação do vigor de lotes de sementes de couve-brócolos (*Brassica oleracea* L. var. italica Plenk). **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 24, n. 2, p. 96-101, 2002.

MATTHEWS, S., WAGNER, M.-H., RATZENBOECK, A., KHAJEH HOSSEINI, M., CASARINI, E., EL KHADEM, R., YAKHLIFI, M. POWELL, A.A. Early counts of radicle emergence during germination as a repeatable and reproducible vigour test for maize. **Seed Testing International**, v. 141, p. 39-45, 2011.

MATTHEWS, S.; EL-KHADEM, R.; CASARINI, E.; KHAJEH-HOSSEINI, M.; NASEHZADEH, M.; WAGNER, M.H. Rate of physiological germination compared with the cold test and accelerated ageing as a repeatable vigour test for maize. **Seed Science and Technology**, v.38, n.2, p.379-389, 2010.

MATTHEWS, S.; KHAJEH-HOSSEINI, M. Length of the lag period of germination and metabolic repair explain vigour differences in seed lots of maizes. **Seed Science and Technology**, v.35, n.1, p.200-212, 2007.

MATTHEWS, S.; KHAJEH-HOSSEINI, M. Mean germination time as an indicator of emergence performance in soil of seed lots of maize (*Zea mays*). **Seed Science and Technology**, Zurich, v.34, p.339-347, 2006.

MATTHEWS, S.; NOLI, E.; DEMIR, I.; KHAJEH-HOSSEINI, M.; WAGNER, M. H. Evaluation of seed quality: from physiology to international standardization. **Seed Science Research**, v. 22, n. 1, p. 69-73, 2012.

MATTHEWS, S.; POWELL, A. Towards automated single counts of radicle emergence to predict seed and seedling vigour. **Seed Testing International (ISTA Bulletin)**, v. 142, p. 44-48, 2012.

MATTHEWS, S.; WAGNER, M. H.; KERR, L.; McLAREN, G.; POWELL, A. A. Automated determination of germination time courses by image capture and early counts of radicle emergence lead to a new vigour test for winter oilseed rape (*Brassica napus*). **Seed Science and Technology**, v.40, n.3, p.413-424, 2012.

MEDEIROS, A. D. D.; SILVA, L. J. D.; CAPOBIANGO, N. P.; FIALHO, C. A.; DIAS, D. C. F. D. S. Assessing the physiological quality of common bean seeds using the Vigor-S® system and its relation to the accelerated aging test. **Journal of Seed Science**, v. 41, n. 2, p. 187-195, 2019.

MONDINI, M. L.; VIEIRA, C. P.; CAMBRAIA, L. A. Época de semeadura: um importante fator que afeta a produtividade da cultura da soja. **Embrapa Agropecuária Oeste-Documentos (INFOTECA-E)**, 2001.

MONDO, V. H. V.; DIAS, M. A. N.; McDONALD, M. B. Seed vigour imaging system for two-day-old corn seedling evaluation. **Seed Technology**, v.33, n.2, p.191-196, 2011.

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. In: KRZYZANOSKI, F.C.; VIEIRA, R.D.; FRANÇA NETO, J.B. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes.** Londrina: ABRATES, p.2.1-2.24, 1999.

NUNES, R. T. C.; SOUZA, U. O.; MORAIS, O. M.; LOURENÇO, C. M. S. Análise de imagens na avaliação da qualidade fisiológica de sementes. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 5, p. 84-90, 2014.

OLIVEIRA, G. R. F.; SALLES, F. K. L., BATISTA, T. B., SILVA, M. S., CICERO, S. M., GOMES-JUNIOR, F. G. Morphological parameters of image processing to characterize primary root emergence in evaluation of tomato seed vigor. **Journal of Seed Science** [online]. 2021, v. 43, e202143005, 2021. Available from: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v43245215>.

OTONI, R. R.; McDONALD, M. B. Moisture and temperature effects on maize and soybean seedlings using the seed vigor imaging system. **Seed Technology**, v.27, n.2, p.243-247, 2005.

PEREIRA, A. F.; MELO, P. G. S.; OLIVEIRA, J. P.; ASSUNÇÃO, A.; BUENO, L. G. Qualidade fisiológica de sementes e desempenho agronômico de genótipos de milho doce. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.38, n.4, p.249-261, 2008.

PEREIRA, F. R. D. S.; BRACHTVOGEL, E. L.; CRUZ, S. C. S.; BICUDO, S. J.; MACHADO, C. G.; PEREIRA, J. C. Qualidade fisiológica de sementes de milho tratadas com molibdênio. **Revista Brasileira de Sementes**, v.34, n.3, p.450-456, 2012.

POWELL, A. A. The controlled deterioration test. In: VENTER, H. A. VAN DE. **Seed vigor testing seminar.** Zürich: ISTA, p.73-87, 1995.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R foundation for statistical computing. Vienna, Austria, 2021. Disponível em: https://www.r-project.org/.

REGO, C. H. Q., CICERO, S. M., FRANÇA-SILVA, F., GOMES-JUIOR, F G. Avaliação do vigor de sementes de feijão-caupi por meio do *software* Vigor-S. **Journal of Seed Science**, v. 43, 2021.

RODRIGUES, M. B. C.; VILLELA, S. A.; TILLMANN, M. A. A.; CARVALHO, R. Pré-hidratação em sementes de soja e eficiência do teste de condutividade elétrica. **Revista Brasileira de Sementes**, Pelotas, v.28, n.2, p:168-181, 2006.

RODRIGUES, M.; GOMES-JUNIOR, F. G.; MARCOS-FILHO, J. Vigor-S: Sistema para Avaliação Automatizada do Vigor de Sementes de Soja. **Journal of Seed Science.** v.42, e202042039, 2020.

SAKO, Y.; McDONALD, M. B.; FUJIMURA, K.; EVANS, A. F.; BENNETT, M. A. A system for automated seed vigour assessment. **Seed Science and Technology**, v.29, n.3, p.625-636, 2001.

SANTOS, J. F; ALVARENGA, R. O.; TIMÓTEO, T. S.; CONFORTO, E. C.; MARCOS-FILHO, J.; VIEIRA, R. D. Avaliação do potencial fisiológico de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v.33, n.4, p.743-751, 2011.

SANTOS, R. F.; GOMES-JUNIOR, F. G.; MARCOS-FILHO, J. Morphological and physiological changes during maturation of okra seeds evaluated through image analysis. **Scientia Agricola**, v. 77, n.3, e20180297, 2020.

SCHEEREN. B. R.; PESKE, S. T.; SCHUCH, L. O. B.; BARROS, A. C. A. Qualidade Fisiológica e Produtividade de Sementes de Soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, n. 3, p. 035-041, 2010.

SCHNEIDER, C. A., RASBAND, W. S., ELICEIRI, K.W. NIH Image to ImageJ: 25 year of image analysis. **Nature Methods**, v. 9, n. 7, p. 671-675, 2012.

SILVA, P. P.; NASCIMENTO, W. M. Definição da metodologia para realização do teste de raios-X em sementes de abóbora. **Horticultura Brasileira,** Brasília, v. 28, n. 2, p. S4273-S4277, 2010.

SILVA, V. N.; SARMENTO, M. B.; SILVEIRA, A. C.; SILVA, C. S.; CICERO, S. M. Avaliação da morfologia interna de sementes de *Acca sellowiana* O. Berg por meio de análise de imagens. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 4, p. 1158-1169, 2013.

ŠKRUBEJ, U.; ROZMAN, Č.; STAJNKO, D. The accuracy of the germination rate of seeds based on image processing and artificial neural networks. **Agricultura**, v. 12, n. 1-2, p. 19-24, 2015.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal.** 6. ed. Porto Alegre: Artmed, p.858, 2017.

TEKRONY, D. M. Precision is an essencial component in seed vigour testing. **Seed Science and Technology**, Zurich, v.31, p.435-447, 2003.

TOLEDO, F. F.; NOVEMBRE, A. D. L. C.; CHAMMA, H. M. C. P.; MASCHIETTO, R. W. Vigor de sementes de milho (*Zea mays* L.) avaliado pela precocidade de emissão da raiz primária. **Scientia Agricola**, v.56, n.1, p. 191-196, 1999.

TORRES, S. B. Envelhecimento acelerado em sementes de pepino com e sem solução salina saturada. **Horticultura Brasileira**, v.23, n.2, p.303-306, 2005.

TORRES, S. B.; MARCOS FILHO, J. Teste de envelhecimento acelerado em sementes de maxixe (Cucumis anguria L.). **Revista Brasileira de Sementes**, v. 23, n. 2, p. 108-112, 2001.

VANZOLINI, S. ARAKI, C. A. S.; SILVA, A. C. M. T.; NAKAGAWA, J. Teste de comprimento de plântula na avaliação da qualidade fisiológica de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v.29, n.2, p.90-96, 2007.

VARELA, V. P.; COSTA, S. de S.; RAMOS, M. B. P. Influência da temperatura e do substrato na germinação de sementes de itaubarana (Acosmium nitens (Vog.) Yakovlev) - Leguminosae, Caesalpinoideae. **Acta amazônica**, v. 35, p. 35-39, 2005.

VARMA, V. S.; DURGA, K. K.; KESHAVULU, K. Seed image analysis: its applications in seed science research. **International Research Journal of Agricultural Sciences**, v. 2, p. 30-36, 2013.

VERTUCCI, C. W. The kinetics of seed imbibition. In: CSSA, ed. **Seed Moisture**. Madison, WI, CSSA Special Publ. n.14, p.93-115, 1989.

VIEIRA, R. D.; BITTENCOURT, S. R. M.; PANOBIANCO, M. Seed vigour - an important component of seed quality in Brazil. **ISTA - Seed Testing International**, n. 126, p. 21-22, 2003.

VIEIRA, R. D; PENARIOL, A. L.; PERECIN, D.; PANOBIANCO, M. Condutividade elétrica e teor de água inicial das sementes de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 1333-1338, 2002.

VIEIRA, R.D.; MARCOS FILHO, J. Teste de envelhecimento acelerado. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R.D.; FRANÇA NETO, J.B, MARCOS FILHO, J. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes.** Londrina: ABRATES, 2020.601 p.

YAGUSHI, J. T.; COSTA, D. S.; FRANÇA-NETO, J. B. Saturated salt accelerated aging and computadorized analysis of seedling images to evaluate soybean seed performance. **Journal of Seed Science**, v.36, n.2, p.213-221, 2014.

ZORATO, M. F. Teste de tetrazólio modificado. **Revista Seed News**, Pelotas, Ano V, nº 4, p. 21, 2001.