

SAPL[®]

SISTEMA DE **ANÁLISE DE PLÂNTULAS**
NA AVALIAÇÃO DO **VIGOR DE SEMENTES**



MÁRCIO DIAS PEREIRA



SAPL[®] :
SISTEMA DE ANÁLISE DE
PLÂNTULAS NA AVALIAÇÃO DO
VIGOR DE SEMENTES

MÁRCIO DIAS PEREIRA

**SAPL[®]:
SISTEMA DE ANÁLISE DE
PLÂNTULAS NA AVALIAÇÃO
DO VIGOR DE SEMENTES**

1ª Edição

Quipá Editora
2026

Copyright © dos autores e autoras. Todos os direitos reservados.

Esta obra é publicada em acesso aberto. O conteúdo dos capítulos, os dados apresentados, bem como a revisão ortográfica e gramatical são de responsabilidade de seus autores, detentores de todos os Direitos Autorais, que permitem o download e o compartilhamento, com a devida atribuição de crédito, mas sem que seja possível alterar a obra, de nenhuma forma, ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial:

Dra. Alana Maria Cerqueira de Oliveira, Instituto Federal do Acre

Dr. Carlos Wagner Oliveira, Universidade Federal do Cariri

Dr. Marcelino Gevilbergue Viana, Universidade Estadual da Paraíba

Me. Mira Raya Paula de Lima, Instituto Federal do Ceará

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P436s

Márcio Dias Pereira

SAPL®: sistema de análise de plântulas na avaliação do vigor de sementes. — Iguatu, CE : Quipá Editora, 2026.

76 p. : il.

ISBN 978-65-5376-535-1

1. Sementes. 2. Sistema de análise. I. Pereira, Márcio Dias. II. Título.

CDD 631.521

Obra publicada pela Quipá Editora em março de 2026.

Quipá Editora
www.quipaeditora.com.br
@quipaeditora

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, **Jorge e Regina**, que me ensinaram, com seu exemplo, que o conhecimento é um caminho que se percorre com humildade, coragem e afeto.

A **todos os meus professores**, que despertaram em mim a curiosidade, o senso crítico e o desejo de transformar a realidade por meio da educação.

A **cada estudante** que tive a honra de ensinar ou orientar, vocês são a razão de cada desafio assumido, de cada projeto iniciado e de cada conquista celebrada. Aprendi muito com cada um de vocês.

E aos **meus colegas de trabalho**, que caminham ao meu lado com parceria, respeito e amizade, fortalecendo diariamente o compromisso coletivo com a ciência, a educação e a inovação.

Dedico este trabalho a todos vocês, que fazem parte da minha história e da construção do SAPL®.

AGRADECIMENTOS

Este livro é, acima de tudo, um gesto de gratidão. Cada página aqui escrita carrega a marca do esforço coletivo, da amizade, da confiança e do compromisso de muitas pessoas que, direta ou indiretamente, tornaram possível a realização do sonho que deu origem ao SAPL[®].

Agradeço, de forma especial, à minha amiga e companheira de tantas jornadas, **Professora Alessandra Mendes**. Nenhuma palavra é suficiente para expressar o impacto da sua participação neste projeto. Foi ela quem transformou nossos desejos, esboços e inquietações em realidade concreta; quem soube ouvir cada necessidade, interpretar cada detalhe e, sobretudo, liderar com sensibilidade, responsabilidade e uma capacidade admirável de motivar as equipes. A Alessandra não apenas participou: ela fundou, incentivou, consolidou e deu vida ao SAPL[®]. Sua dedicação silenciosa, sua força tranquila e seu rigor no trabalho em equipe foram determinantes para que este sonho deixasse de ser apenas uma ideia e ganhasse o mundo.

Agradeço também a **todos os estudantes** que passaram pelo laboratório nesses anos, estudantes dos cursos técnicos, de graduação, de pós-graduação e bolsistas de pós-doutorado. Foram meses, anos, de testes contínuos, de paciência, de noites longas no laboratório, de finais de semana e feriados dedicados

à ciência. Vocês são, e sempre serão, o grande motor que faz a pesquisa acontecer no nosso laboratório. Cada algoritmo ajustado, cada imagem tratada, cada plântula medida traz a marca do empenho e da curiosidade de vocês.

Sem jamais diminuir o valor dos muitos estudantes que contribuíram, registro aqui um agradecimento especial a três dos pioneiros, que representam todos os demais: **Rogério Severiano, Paloma Rayane e André Medeiros**. Vocês estavam lá quando tudo ainda era uma semente e ajudaram, com esforço e coragem, a fazê-la germinar.

Meu agradecimento igualmente profundo às **Pró-Reitorias de Pesquisa, de Pós-Graduação e de Extensão da UFRN**, cujo apoio institucional sustentou bolsas, equipamentos, infraestrutura e condições reais para que o trabalho fosse conduzido com seriedade. Sem esse suporte, o SAPL[®] talvez não tivesse ultrapassado as fronteiras do sonho.

Agradeço também às agências de fomento **FAPERN, CAPES e CNPq**, que acreditaram em nossa proposta e viabilizaram financeiramente as pesquisas contínuas que embasam este software. Cada edital, cada bolsa, cada recurso recebido retornou à sociedade em forma de conhecimento, inovação e democratização tecnológica.

Não poderia deixar de agradecer aos meus **amigos e familiares**, que compreenderam minhas ausências e o tempo

silencioso que a pesquisa exige, as noites dedicadas a revisar artigos, as longas horas de leitura, os finais de semana convertidos em trabalho solitário. Este livro não nasceu apenas do esforço intelectual, mas também do amor e da paciência daqueles que me cercam.

Este livro é mais do que uma apresentação técnica do SAPL®. Ele é, sobretudo, uma homenagem, um tributo a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para que o SAPL surgisse. Cada capítulo é um agradecimento. Cada linha, um reconhecimento.

A todos vocês, meu profundo e sincero **muito obrigado**.

PREFÁCIO

A evolução da tecnologia de sementes no Brasil sempre caminhou lado a lado com a capacidade de transformar desafios estruturais em oportunidades científicas. Durante alguns anos, no início do uso da análise de imagens de sementes no nosso país, a maioria dos laboratórios e instituições de pesquisa que desejavam avançar na avaliação digital de vigor dependiam de softwares caros, licenciados e, muitas vezes, restritos a grandes centros, ou a algumas poucas instituições que detinham o seu licenciamento por aqui.

A dificuldade de acesso a esses sistemas acabava criando uma barreira significativa para instituições situadas em regiões menos favorecidas ou com limitações de financiamento, que era a nossa realidade no Laboratório de sementes da EAJ/UFRN, um grupo de pesquisa jovem e recém-iniciado. Mas foi justamente dessa lacuna, sentida por nós, mas também por professores, pesquisadores e estudantes de muitas instituições brasileiras, que surgiu a ideia de desenvolver uma ferramenta acessível, gratuita, de fácil utilização e que não exigisse sistemas embarcados ou equipamentos mais sofisticados, mas que fosse capaz de democratizar o uso da análise de imagens na avaliação do vigor de sementes, pelo menos para o nosso grupo. Se não tínhamos condições de adquirir uma dessas ferramentas

disponíveis ou viajar para as instituições que já utilizavam a análise de imagens, a saída foi criar a nossa própria ferramenta de trabalho.

A concepção do Sistema de Análise de Plântulas (SAPL[®]) nasceu da percepção de que o Brasil, país de dimensão continental e de imensa diversidade agrícola e florestal, precisava de uma alternativa simples, robusta e gratuita aos softwares internacionais utilizados para mensuração morfológica de plântulas. A intenção inicial era clara: criar um sistema inspirado nos modelos já consagrados, como o SVIS[®], mas com duas características fundamentais, gratuidade e facilidade de captura e processamento de imagens. Essas duas premissas tornaram-se espinha dorsal do projeto.

O ponto de partida foi o estudo aprofundado das metodologias existentes e a participação em cursos oferecidos pela reconhecida equipe de tecnologia de sementes da ESALQ/USP, que reforçaram a importância da análise de plântulas como abordagem objetiva, padronizável e cientificamente consistente. Com essas bases teóricas e a experiência de profissionais de outras instituições, nasceu o passo seguinte decisivo: buscar parceiros que transformassem o conceito em realidade. E essa etapa encontrou terreno fértil no grupo de professores da informática da Escola Agrícola de Jundiaí (EAJ/UFRN).

A acolhida calorosa da equipe de informática da EAJ, de modo especial pela minha querida amiga, professora Alessandra Mendes, marcou o início de uma jornada de desenvolvimento colaborativo que uniu ciência, tecnologia e formação profissional. Com o entusiasmo e dedicação de estudantes dos cursos Técnico em Informática e de Análise e Desenvolvimento de Sistemas, o projeto ganhou vida. A cada reunião, esboço de interface, algoritmo ajustado e teste preliminar, o SAPL[®] evoluiu, sempre impulsionado pela convicção de que a inovação precisa ser, acima de tudo, inclusiva.

O processo de criação não foi linear. Houve idas e vindas, reformulações e longas discussões técnicas, sempre acompanhadas da energia criativa dos estudantes, da competência da equipe técnica e do espírito colaborativo que caracteriza a EAJ/UFRN. Quando as primeiras versões funcionais surgiram, iniciou-se a fase de validação no Laboratório de Sementes do GETSem, onde o software foi testado em diferentes espécies agrícolas e florestais, comparado a métodos tradicionais e ajustado continuamente para garantir rigor científico e precisão morfométrica.

Assim que o SAPL[®] foi apresentado nos primeiros congressos e submetido às primeiras revistas científicas, a receptividade surpreendeu: vieram elogios, entusiasmo e, sobretudo, sugestões valiosas. Cada crítica construtiva se

transformou em aprimoramento; cada teste com estudantes de cursos técnicos, graduação, pós-graduação e pós-doutorado gerou novas funcionalidades, correções e avanços. O SAPL® passou a ser, de forma muito concreta, um software lapidado a muitas mãos, por cada um daqueles que passaram pelo nosso laboratório durante aqueles anos de trabalho.

Hoje, já registrado e validado por muitas pesquisas, o SAPL representa não apenas uma ferramenta tecnológica, mas um marco da capacidade inovadora da universidade pública brasileira. Ele democratiza o acesso à análise de imagens, fortalece laboratórios regionais, promove formação técnica de excelência, apoia pesquisas em sementes nativas e agrícolas e coloca o Brasil no mapa da automação aplicada à tecnologia de sementes. Vale ressaltar que durante esse período em que estivemos trabalhando nesse projeto, outras iniciativas de muito sucesso ocorreram em outras instituições, gerando produtos gratuitos ou pagos, mas que tem contribuído muito para o desenvolvimento da pesquisa e do setor de sementes. Essas ferramentas não são concorrentes, mas se complementam.

Este livro surge, portanto, como uma extensão natural desse percurso: uma obra escrita para orientar, explicar, contextualizar e inspirar. É um guia prático, mas também uma memória institucional; um manual técnico, mas igualmente um testemunho do poder transformador da colaboração acadêmica.

Ao apresentar os fundamentos da análise de imagens, contextualizar o avanço da fenotipagem digital e detalhar o funcionamento do SAPL[®], este livro busca não apenas ensinar, mas também motivar novos desenvolvimentos, estimular a pesquisa científica e fomentar o uso responsável e eficiente da tecnologia.

Que as próximas páginas incentivem pesquisadores, estudantes, analistas de sementes e profissionais da área a explorarem todo o potencial dessa ferramenta que nasceu da união entre necessidade, criatividade e compromisso público com a ciência.

Márcio Dias Pereira

APRESENTAÇÃO

A avaliação do vigor de sementes é fundamental para o estabelecimento uniforme das culturas e para a eficiência dos sistemas produtivos agrícolas, porém os métodos tradicionalmente utilizados na análise de sementes apresentam limitações relacionadas à subjetividade, tempo de execução e variabilidade entre laboratórios. O avanço da análise digital de imagens surge como alternativa capaz de transformar a avaliação da qualidade de sementes a partir das características morfológicas de plântulas, que podem ser convertidas em indicadores objetivos e quantitativos de qualidade fisiológica, ampliando a precisão e a padronização das análises.

Este livro apresenta os fundamentos científicos, o desenvolvimento, a validação e as aplicações do Sistema de Análise de Plântulas (SAPL[®]), uma ferramenta digital criada para avaliar o vigor de sementes por meio da análise automatizada do crescimento inicial de plântulas, oferecendo uma alternativa acessível, padronizada e reprodutível para laboratórios de sementes, ensino e pesquisa.

O SAPL[®] baseia-se na aquisição padronizada de imagens digitais de plântulas germinadas, seguida pelo processamento computacional das imagens, segmentação das estruturas e extração automática de parâmetros morfométricos,

como comprimento radicular, parte aérea e comprimento total. A partir dessas variáveis, o sistema calcula índices de crescimento, uniformidade, vigor e vigor corrigido, permitindo a comparação com testes fisiológicos tradicionais e a geração de relatórios quantitativos para análise estatística.

Estudos apresentados ao longo da obra demonstram a forte correlação entre os parâmetros obtidos pelo SAPL® e os testes clássicos de vigor, como envelhecimento acelerado, condutividade elétrica e teste de frio, em diferentes espécies agrícolas e florestais. O sistema mostrou elevada capacidade de discriminar lotes com distintos níveis de vigor, detectar diferenças sutis no crescimento inicial das plântulas e antecipar informações relacionadas ao desempenho em campo, frequentemente com maior rapidez e menor subjetividade que os métodos convencionais.

O SAPL® apresenta-se como uma ferramenta moderna para uso na análise de sementes, integrando automação, análise digital e acessibilidade tecnológica. Ao democratizar o uso da análise de imagens e fornecer dados objetivos e reprodutíveis, o sistema contribui para a modernização das rotinas laboratoriais, formação acadêmica e tomada de decisão no setor produtivo, reforçando o papel da fenotipagem digital como uma das principais tendências na avaliação da qualidade fisiológica de sementes.

SUMÁRIO

PREFÁCIO

APRESENTAÇÃO

CAPÍTULO 1 **16**

ANÁLISE DE IMAGENS EM SEMENTES

CAPÍTULO 2 **32**

O SISTEMA DE ANÁLISE DE PLÂNTULAS (SAPL®)

CAPÍTULO 3 **39**

GUIA PRÁTICO PARA O USO DO SAPL®

CAPÍTULO 4 **48**

RESULTADOS E APLICAÇÕES DO SAPL® EM
DIFERENTES ESPÉCIES

CAPÍTULO 5 **58**

COMPARAÇÃO DO SAPL® COM OUTROS
SOFTWARES DE ANÁLISE DE PLÂNTULAS

SOBRE O AUTOR **75**

CAPÍTULO 1

ANÁLISE DE IMAGENS EM SEMENTES

INTRODUÇÃO

A avaliação da qualidade de sementes é um componente estratégico para a eficiência dos sistemas produtivos agrícolas. O desempenho das sementes no campo está diretamente associado à sua viabilidade e vigor, fatores determinantes para a implantação de lavouras produtivas e uniformes (MARCOS-FILHO, 2015). Tradicionalmente, essa avaliação depende de testes fisiológicos convencionais, como os testes de germinação, envelhecimento acelerado, condutividade elétrica, frio, tetrazólio, que já são normatizados por órgãos como o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), no Brasil e a International Seed Testing Association (ISTA) (ISTA, 2023), no âmbito internacional.

Embora amplamente utilizados, esses métodos apresentam limitações, como subjetividade na interpretação visual, elevado tempo de execução e variabilidade entre laboratórios (KIKUTI; MARCOS-FILHO, 2014). O avanço da automação e das tecnologias digitais tem impulsionado o desenvolvimento de alternativas mais rápidas e reprodutíveis,

entre as quais se destaca a análise de imagens, capaz de transformar características morfológicas de plântulas em indicadores quantitativos e objetivos de vigor (ARAÚJO et al., 2020).

A incorporação de sistemas de captura digital, algoritmos de segmentação e softwares específicos abrem novas possibilidades para a avaliação da qualidade fisiológica das sementes, integrando precisão científica, rapidez e padronização (GOMES-JÚNIOR; CICERO, 2012).

Evolução da análise de imagens em sementes

O uso de tecnologias de imagem na área de sementes teve início nas décadas de 1970 e 1980, em estudos destinados à detecção de danos mecânicos e patologias internas (DELL'AQUILA, 2007). Com o avanço das câmeras digitais e de softwares acessíveis, o campo expandiu-se rapidamente a partir dos anos 2000.

Entre os marcos desta evolução destacam-se técnicas como as que utilizam a Tomografia computadorizada para avaliação interna da semente, permitindo visualizar danos, espaços internos e malformações (Raios x) sem destruir o material (FAHAD et al., 2018). Também tem se ampliado o uso de Softwares acadêmicos e comerciais especializados na análise

da forma, cor e textura, como ImageJ, Tomato Analyzer, Ground Eye e Seed Counter (GOMES-JÚNIOR; CICERO, 2012).

Mais recentemente, softwares e outras técnicas que empregam Inteligência artificial e aprendizado de máquina tem se mostrado capazes de correlacionar padrões visuais com vigor e potencial de emergência (ZHAO et al., 2019).

Tanto o processamento digital de imagens, como a inteligência artificial, tem utilizado o princípio já consagrado da análise de vigor a partir da análise do vigor de plântulas, permitindo mensurar o desempenho inicial a partir de características morfológicas, abordagem presente em sistemas como SAPL®, SVIS® e Vigor-S® (HOFFMASTER et al., 2003; GOMES-JÚNIOR et al., 2014).

Com isso, a análise de imagens deixou de ser apenas uma ferramenta complementar e passou a constituir um método robusto para avaliação avançada da qualidade fisiológica.

Fundamentos da análise de imagens aplicada a plântulas

A análise de imagens em plântulas envolve três etapas principais:

a) Aquisição das imagens

A captura pode ser feita por câmeras digitais, smartphones calibrados (Figura 1) ou scanners de alta resolução. A padronização da iluminação, distância, ângulo e contraste é fundamental para garantir a repetibilidade dos resultados (GOMES-JÚNIOR et al., 2014).

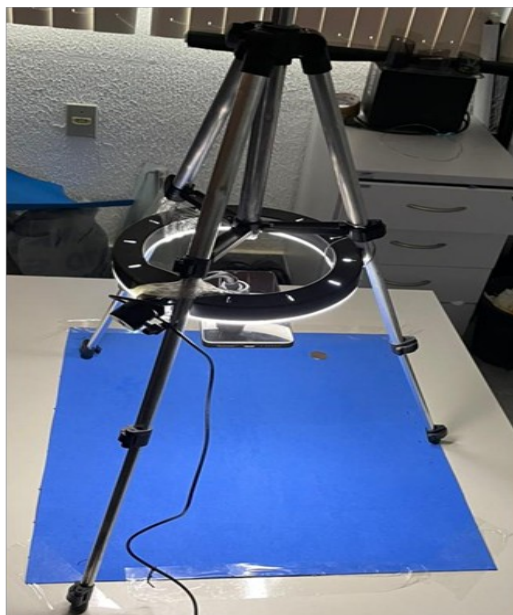


Figura 1 - Suporte preparado para captura de imagem para aquisição de imagens de plântulas em Laboratório de sementes, a partir de um smartphone, com iluminação e distância entre o aparelho e as plântulas padronizadas.

b) Processamento digital

O processamento digital das imagens constitui uma etapa fundamental na análise automatizada de plântulas, pois é a partir dele que se extraem, com precisão, as informações morfológicas necessárias para a avaliação do vigor.

Esse processo envolve um conjunto de operações sequenciais que permitem isolar a plântula do ambiente no qual ela foi fotografada, eliminar interferências e transformar os elementos visuais em dados mensuráveis. Inicialmente, realiza-se a segmentação da plântula em relação ao fundo, etapa na qual os algoritmos de contraste, limiarização ou classificação automática distinguem a estrutura biológica dos elementos não desejados da imagem. Em seguida, aplica-se a remoção de ruídos e artefatos, procedimento essencial para evitar que pequenas imperfeições do fundo, sombras ou manchas sejam interpretadas equivocadamente como partes da plântula, comprometendo a acurácia das medições.

Após o refinamento da imagem, ocorre a identificação automática das estruturas principais, como a raiz primária e a parte aérea. Essa distinção é crucial, pois cada componente da plântula apresenta padrões de crescimento distintos e fornece informações fisiológicas específicas. A partir dessa identificação, torna-se possível realizar o cálculo automático de comprimentos,

áreas, ângulos e outros parâmetros morfométricos, convertendo formas e regiões da imagem em valores numéricos que refletem o desempenho fisiológico do lote de sementes.

Softwares como ImageJ, SAPL®, SVIS®, WinRhizo® e técnicas em Python/OpenCV têm sido amplamente aplicados para o processamento de imagens de plântulas (ARAÚJO et al., 2020).

c) Extração de parâmetros morfológicos

A partir das imagens devidamente processadas, torna-se possível extrair uma ampla variedade de parâmetros morfológicos que ajudam a caracterizar, de forma objetiva e quantitativa, o desempenho inicial das plântulas. Entre esses indicadores, destaca-se o comprimento da raiz primária, que fornece informações essenciais sobre a capacidade da semente em iniciar o crescimento radicular, etapa fundamental para a absorção de água e nutrientes.

De modo complementar, o comprimento da parte aérea permite avaliar o desenvolvimento do eixo hipocótilo–epicótilo ou do coleótilo, dependendo da espécie, refletindo o potencial fotossintético inicial. A soma dessas duas variáveis resulta no comprimento total da plântula, parâmetro amplamente utilizado em estudos de vigor e germinação.

Além das medidas lineares, a análise digital possibilita a mensuração da área ocupada pela plântula, que integra parâmetros de expansão radicular e aérea, oferecendo uma visão mais abrangente da biomassa inicial. Outro indicador relevante é o ângulo de emergência radicular, que revela não apenas o padrão de crescimento inicial, mas também a orientação espacial da raiz primária, frequentemente associada à eficiência de exploração do solo.

A tecnologia de imagens também permite avaliar a uniformidade entre plântulas, variável fundamental para prever o comportamento do lote em campo, uma vez que lavouras homogêneas apresentam maior competitividade e estabilidade produtiva. Por fim, a determinação da taxa de crescimento, obtida por análises temporais sucessivas, permite compreender a dinâmica de desenvolvimento das plântulas nas primeiras horas ou dias após a germinação.

Em conjunto, esses parâmetros configuram um retrato preciso do vigor fisiológico da semente, estando diretamente associados ao estabelecimento rápido e uniforme das plantas no campo e, conseqüentemente, ao desempenho agrônômico final da cultura (MARCOS-FILHO, 2015).

Vantagens da análise de imagens sobre métodos tradicionais

A análise de imagens oferece um conjunto de vantagens expressivas em comparação aos métodos tradicionais de avaliação da qualidade fisiológica de sementes, representando um avanço significativo para a área.

Uma das principais contribuições é a objetividade, pois o uso de algoritmos substitui a interpretação humana, eliminando grande parte da subjetividade inerente às avaliações visuais realizadas por analistas, como destacado por Hoffmaster et al. (2003). Essa objetividade se combina à rapidez operacional, já que sistemas automatizados permitem analisar simultaneamente centenas de plântulas em poucos segundos, otimizando o fluxo de trabalho em laboratórios de sementes.

Outra vantagem fundamental é a padronização dos resultados, uma vez que os softwares aplicam sempre os mesmos critérios de segmentação, mensuração e classificação, reduzindo a variabilidade entre analistas, equipamentos e laboratórios, uma limitação frequentemente observada nos testes fisiológicos convencionais. Além disso, a possibilidade de armazenamento digital das imagens e dos dados numéricos amplia a confiabilidade das análises, pois permite auditorias,

comparações históricas e reavaliações sem a necessidade de repetir experimentos destrutivos.

A análise digital também se destaca pela alta precisão, visto que as mensurações são realizadas em escala milimétrica ou submilimétrica, permitindo detectar pequenas diferenças entre lotes que dificilmente seriam perceptíveis a olho nu. Essa precisão é ainda mais fortalecida pela crescente integração com sistemas de inteligência artificial, nos quais modelos preditivos, baseados em aprendizado de máquina, podem anteciper o desempenho das sementes no campo a partir de padrões sutis identificados nas plântulas (ZHAO et al., 2019).

Diversos estudos comprovam que as variáveis extraídas por análise de imagens apresentam forte correlação com testes fisiológicos tradicionais, como condutividade elétrica, tetrazólio e envelhecimento acelerado, evidenciando que essa tecnologia não apenas complementa, mas pode superar a robustez dos métodos convencionais (GOMES-JÚNIOR; CÍCERO, 2012). Assim, a análise de imagens consolida-se como uma abordagem moderna, confiável e altamente eficiente para a avaliação da qualidade de sementes.

Aplicações específicas em espécies agrícolas e florestais

A aplicação da análise de imagens em sementes e plântulas têm apresentado resultados expressivos em uma ampla diversidade de espécies, abrangendo tanto culturas agrícolas de grande escala quanto plantas florestais e nativas utilizadas em programas de conservação e restauração ecológica.

No contexto das espécies agrícolas, a soja (*Glycine max*) constitui um dos modelos mais estudados. Trabalhos recentes demonstram que variáveis como o comprimento total da plântula, a área radicular e a uniformidade do crescimento apresentam forte correlação com a emergência em campo e com o desempenho das plantas adultas, revelando o potencial da análise digital como ferramenta preditiva do vigor (ZHAO et al., 2019; ARAÚJO et al., 2020).

Resultados semelhantes são observados para o milho (*Zea mays*), no qual as imagens permitem diferenciar rapidamente lotes com distintos níveis de vigor, além de estimar sua capacidade de competir com plantas daninhas nas fases iniciais do desenvolvimento, característica essencial para cultivos em larga escala (MAKKAR et al., 2015).

Outra espécie de destaque é o algodão (*Gossypium hirsutum*), cujo desempenho inicial é altamente sensível às

condições de armazenamento e ao tratamento químico das sementes. A análise do crescimento de plântulas por meio de sistemas digitais tem permitido identificar com maior precisão os impactos desses fatores, oferecendo suporte para decisões mais assertivas em processos de beneficiamento e comercialização de sementes (GOMES-JÚNIOR et al., 2014). Em culturas como o feijão (*Phaseolus vulgaris*), a morfometria digital tem sido especialmente útil para detectar danos mecânicos e fisiológicos ainda na fase inicial de germinação, fornecendo diagnósticos mais rápidos e detalhados do que os métodos tradicionais (SILVA et al., 2018).

No âmbito das espécies florestais e nativas, o uso de tecnologias de imagem também tem avançado significativamente. Em espécies amplamente utilizadas em silvicultura, como *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp., sistemas automatizados têm permitido selecionar, ainda no viveiro, plântulas mais vigorosas e uniformes, aumentando a eficiência produtiva e reduzindo perdas no campo (OLIVEIRA et al., 2020). Para espécies da Caatinga, como *Amburana cearensis*, *Mimosa tenuiflora* e *Libidibia ferrea*, a análise digital tem contribuído para estudos envolvendo germinação, morfologia inicial e respostas ao estresse hídrico, tema de grande relevância para programas de revegetação em ambientes semiáridos (SANTOS et al., 2021).

Além disso, em espécies destinadas à restauração ecológica, os softwares de imagem têm auxiliado na seleção de sementes e mudas de maior vigor, o que aumenta a taxa de sobrevivência em ambientes degradados e acelera o processo de recomposição da vegetação (FAHAD et al., 2018). Esses avanços demonstram que a análise de imagens constitui uma tecnologia versátil, aplicável tanto a culturas agrícolas de alta importância econômica quanto a espécies nativas de grande valor ecológico, reforçando seu papel estratégico na agricultura, na silvicultura e na conservação ambiental.

Perspectivas futuras

As perspectivas futuras para a análise de imagens em sementes e plântulas apontam para um cenário de crescente integração entre tecnologias digitais avançadas e as rotinas laboratoriais da tecnologia de sementes.

A tendência global é que os sistemas de avaliação se tornem cada vez mais automatizados, inteligentes e acessíveis, por meio da incorporação de inteligência artificial e, especialmente, de técnicas de aprendizado profundo (deep learning), capazes de identificar padrões complexos nas imagens e realizar classificações ou previsões com alto grau de acurácia. Essas abordagens já demonstram potencial para substituir

etapas manuais de interpretação, reduzindo erros humanos e acelerando significativamente o processo de análise (ZHAO et al., 2019).

Paralelamente, o uso de câmeras de baixo custo, como webcams de alta resolução e câmeras de smartphones, aliado ao desenvolvimento de softwares livres e de código aberto, tende a democratizar o acesso às tecnologias de análise digital. Essa combinação permite que laboratórios públicos, unidades de ensino técnico, cooperativas e pequenos produtores possam aplicar a técnica sem grandes investimentos em equipamentos sofisticados. Da mesma forma, o avanço dos sistemas embarcados, como placas do tipo Raspberry Pi e Arduino, e de dispositivos móveis, capazes de processar imagens diretamente em campo, abre caminho para análises rápidas e descentralizadas, incorporando a tecnologia ao cotidiano da agricultura de precisão.

Essas inovações ampliam de forma significativa o potencial de uso da análise de imagens em diversas áreas da cadeia produtiva, incluindo programas de melhoramento genético, nos quais a avaliação automatizada de plântulas pode acelerar a seleção de genótipos superiores; processos de certificação de sementes, que se beneficiam de métodos mais padronizados e auditáveis; manejo florestal, por meio da seleção precoce de mudas de qualidade; e diversas aplicações em

agricultura de precisão, nas quais informações morfológicas podem ser integradas a modelos preditivos ou sistemas de tomada de decisão.

No Brasil, o desenvolvimento de soluções nacionais têm desempenhado papel crucial para a consolidação da tecnologia. Entre essas iniciativas destaca-se o SAPL® – Sistema de Análise de Plântulas, desenvolvido pelo grupo GETSem da EAJ/UFRN, que representa um importante avanço ao oferecer uma plataforma acessível, adaptada às condições dos laboratórios brasileiros e alinhada às demandas da pesquisa acadêmica. Ferramentas como o SAPL® contribuem diretamente para a democratização da análise digital, fortalecendo a produção científica nacional e ampliando o uso dessa tecnologia em instituições de ensino, pesquisa e extensão voltadas à agricultura.

A análise de imagens aplicada a sementes e plântulas representa um dos maiores avanços da tecnologia de sementes nas últimas décadas. Sua capacidade de fornecer avaliações rápidas, precisas e reprodutíveis transforma-a em ferramenta indispensável para empresas, produtores, laboratórios e instituições de pesquisa. O uso crescente dessa técnica, aliado à inteligência artificial e ao desenvolvimento de plataformas nacionais como o SAPL®, projeta um futuro em que a

caracterização fisiológica de sementes será cada vez mais automatizada, padronizada e acessível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, A. S. F.; FERREIRA, D. F.; SILVA, J. R. R.; SOUZA, M. L. S.; CARVALHO, P. E. R. Image analysis in the assessment of seed vigor: advances and perspectives. *Seed Science and Technology*, Bassersdorf, v. 48, p. 45–58, 2020.

DELL'AQUILA, A. Towards new computer imaging techniques applied to seed quality testing and sorting. *Seed Science and Technology*, Bassersdorf, v. 35, p. 519–538, 2007.

FAHAD, S.; SAEED, M.; ZAHOOR, R.; KHAN, M. A.; KHAN, H. Evaluating seed quality and seedling performance using imaging techniques: A review. *Agricultural Sciences*, v. 9, p. 1234–1244, 2018.

GOMES-JÚNIOR, F. G.; CICERO, S. M. Computerized image analysis to assess seed vigor of maize. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 69, n. 1, p. 49–54, 2012.

GOMES-JÚNIOR, F. G.; OLIVEIRA, R. R.; BARBOSA, R. M.; SILVA, V. N.; SOUZA, J. L.; CICERO, S. M. Seed Vigor Imaging System (SVIS®) for evaluating seedling growth and predicting soybean seed vigor. *Journal of Seed Science*, Londrina, v. 36, n. 2, p. 213–221, 2014.

HOFFMASTER, A. L.; MCLEAN, R. J.; GONG, F.; JOHNSON, W. B. The Seed Vigor Imaging System (SVIS®) for soybean and corn seedlings. *Seed Technology*, v. 25, n. 1, p. 7–20, 2003.

INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION – ISTA. International rules for seed testing. Bassersdorf: ISTA, 2023.

KIKUTI, A. L. P.; MARCOS-FILHO, J. Métodos modernos para avaliação da qualidade fisiológica de sementes. Revista Brasileira de Sementes, Londrina, v. 36, n. 1, p. 1–19, 2014.

MAKKAR, H.; LEE, C.; CHEN, J.; KIM, D.; PARK, S. Imaging-based seedling traits and their relation to maize seed vigor. Crop Science, v. 55, p. 1–12, 2015.

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

OLIVEIRA, T. B.; SOUZA, P. V.; LIMA, R. M.; COSTA, A. M.; SANTOS, J. E. Digital morphometric analysis of forest seedlings: applications for quality assessment. Forestry Research, v. 47, p. 677–686, 2020.

SANTOS, R. C.; DIAS, A. C. R. V.; ANDRADE, L. H. M.; PEREIRA, F. A.; OLIVEIRA, H. C. F. Seedling image analysis for native species of the Caatinga biome. Brazilian Journal of Botany, v. 44, p. 701–715, 2021.

SILVA, C. B.; LIMA, R. M.; GOMES-JÚNIOR, F. G.; CICERO, S. M.; BARBOSA, R. M. Digital phenotyping for damage detection in bean seeds. Journal of Seed Science, Londrina, v. 40, n. 4, p. 415–424, 2018.

ZHAO, Y.; LI, X.; WANG, J.; TIAN, Q.; ZHANG, B. Deep learning-based seed vigor prediction in soybean. Biosystems Engineering, v. 178, p. 1–13, 2019.

CAPÍTULO 2

O SISTEMA DE ANÁLISE DE PLÂNTULAS (SAPL®)

INTRODUÇÃO AO SAPL® E SUA CONCEPÇÃO

A análise de imagens aplicada à avaliação da qualidade fisiológica de sementes ganhou grande destaque nas últimas décadas, especialmente a partir da validação científica de softwares que permitem quantificar parâmetros morfológicos de plântulas com alta precisão (BARBOSA et al., 2013; ALVES et al., 2012).

Nesse contexto, diversos grupos de pesquisa no Brasil vêm desenvolvendo soluções adaptadas às condições locais de produção de sementes, com foco na inovação e padronização de metodologias. Na Escola Agrícola de Jundiá (EAJ-UFRN), o Grupo de Estudos em Tecnologia de Sementes (GETSem) desenvolveu, em parceria com o Grupo de Estudos em Processamento Digital de imagens, o Sistema de Análise de Plântulas (SAPL®), com o objetivo de criar uma ferramenta digital capaz de mensurar o vigor de sementes a partir de fotografias digitais de plântulas germinadas em condições de laboratório. O sistema foi concebido como resposta à necessidade de um

método ágil, padronizado e de baixo custo (PEREIRA et al., 2020).

O SAPL® é um software de análise de imagens desenvolvido para a avaliação do vigor de sementes com base no crescimento inicial das plântulas. Ele utiliza fotografias digitais obtidas em scanners ou câmeras de alta resolução, como as de celulares e smartphones, processadas em ambiente controlado de iluminação e contraste.

A arquitetura do sistema foi projetada para: reconhecer automaticamente a morfologia das plântulas oriundas de sementes de espécies determinadas. O sistema mede o comprimento da raiz primária, da parte aérea e da plântula total. Uma vantagem do processamento utilizando o SAPL® é que ele permite a identificação de falhas de desenvolvimento e calcular índices diferentes índices relacionados ao vigor, baseado nos trabalhos desenvolvidos por Sako et al. (2001). também é possível exportar relatórios de resultados individuais, por repetição, de todas as plântulas analisadas, em formato de planilha, permitindo análises estatísticas subsequentes.

Apesar de ser semelhante a outros softwares internacionais, como o Seedling Vigor Imaging System (SVIS®) desenvolvido pela Ohio State University (SAKO et al., 2001), o SAPL® se diferencia por ter sido adaptado para que a captação

de imagens seja feita de forma simples, por meio de câmeras de celulares ou outras câmeras digitais comuns, em condições de laboratórios locais, tornando-o uma ferramenta acessível e prática.

Etapas do funcionamento do SAPL®

O funcionamento do sistema está baseado em três etapas principais:

- a) **Aquisição das imagens** – plântulas germinadas em papel toalha ou substrato similar são retiradas e dispostas em uma folha de EVA, com linhas brancas que separam cada uma das plântulas e uma métrica, geralmente uma moeda de medidas conhecidas ou dois pontos distantes 1 cm um do outro (Figura 2). As imagens são captadas por meio de uma câmera digital (celulares, smartphones ou similares), de modo a enquadrar toda a folha de EVA, estando a câmera formando um ângulo de 90 graus em relação a o eixo do EVA. Em seguida, as imagens são armazenadas em um computador, em pastas identificadas. O sistema recomenda resolução mínima de 300 dpi para garantir a nitidez das estruturas.

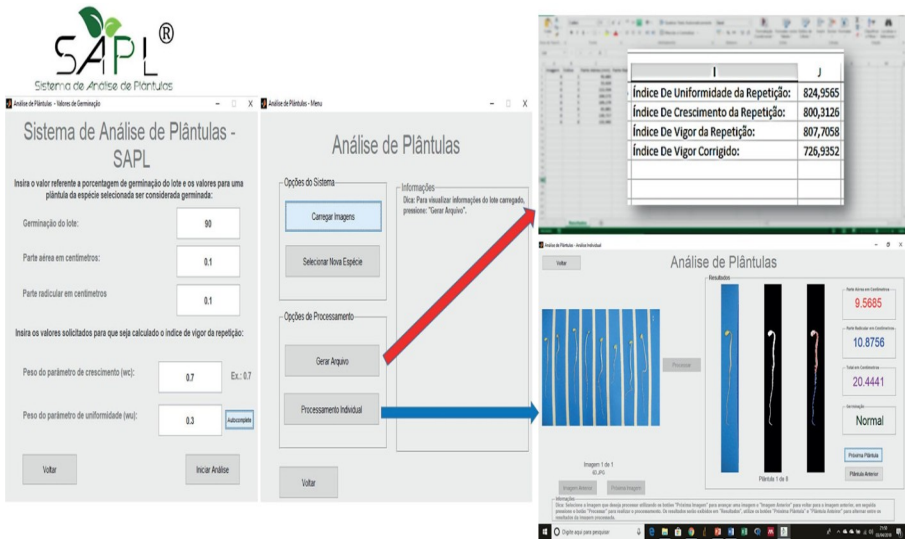


Figura 2 - Imagem mostrando o processamento das plântulas no SAPL®, a partir da aquisição de imagens em um fundo azul de EVA.

- b) **Processamento digital** – o software aplica algoritmos de segmentação de imagens para identificar as diferentes partes da plântula. Técnicas de reconhecimento de bordas e contraste permitem distinguir raiz, parte aérea e anomalias.
- c) **Mensuração e análise** – a partir da imagem tratada, o SAPL calcula parâmetros morfométricos como comprimento radicular, parte aérea, comprimento total e uniformidade do lote. Esses dados são transformados em índices de vigor que

podem ser correlacionados com testes tradicionais (ALVES et al., 2012; BARBOSA et al., 2013).

Diferenciais do SAPL®

O diferencial do SAPL® está em sua interface intuitiva, que facilita o uso por qualquer pessoa que saiba operar minimamente o computador, e na integração com banco de dados, permitindo arquivamento de imagens e resultados para análises históricas.

Entre os principais diferenciais do SAPL, destacam-se:

- **Acessibilidade:** desenvolvido em ambiente acadêmico, é de baixo custo e adaptável à realidade dos laboratórios brasileiros;
- **Flexibilidade:** pode ser usado em diferentes espécies agrícolas e florestais, desde grandes culturas como soja e milho até espécies nativas;
- **Integração acadêmica:** além do uso em pesquisas, é uma ferramenta didática para formação de estudantes em disciplinas ligadas à tecnologia de sementes;
- **Validação científica:** artigos publicados em revistas nacionais e internacionais já demonstraram sua eficiência na diferenciação de lotes de sementes e na correlação com os testes tradicionais de vigor (PEREIRA et al., 2019; PEREIRA et al., 2020).

Ferramentas como o SAPL® não apenas fortalecem a pesquisa em tecnologia de sementes, mas também se constituem como instrumentos estratégicos para empresas de sementes e programas de melhoramento, fornecendo dados objetivos, rápidos e reprodutíveis.

O software, junto com outros softwares e produtos análogos produzidos e disponíveis no país, são um marco para a pesquisa em tecnologia de sementes no Brasil, unindo inovação científica, aplicabilidade prática e compromisso com a qualidade. A ferramenta já se mostrou consolidada como alternativa viável para a avaliação do vigor de sementes de diferentes espécies e seus resultados reforçam o papel da análise de imagens como o futuro promissor dos testes de vigor de sementes.

Nos capítulos seguintes, será apresentado o passo a passo prático de uso do SAPL®, com os comandos principais e a descrição detalhada do processo de análise.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, C. Z.; OLIVEIRA, L. S.; SILVA, R. C.; PEREIRA, J. T.; SOUZA, D. E. Avaliação do vigor de sementes de soja por meio da análise computadorizada de imagens de plântulas. *Revista Brasileira de Sementes*, Londrina, v. 34, n. 1, p. 63–70, 2012.

BARBOSA, R. M.; VIEIRA, B. G. T. L.; GOMES-JÚNIOR, F. G.; VIEIRA, R. D. Automated image analysis of seedling growth as a

vigor test for maize seeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 95, p. 11–19, 2013.

MARCOS-FILHO, J. *Fisiologia de sementes de plantas cultivadas*. 2. ed. Londrina: ABRATES, 2015.

PEREIRA, C. E.; SANTOS, T. B.; OLIVEIRA, R. R.; COSTA, A. M.; MELO, R. S.; LIMA, K. A. P. Digital image analysis of seedlings for evaluating vigor of native forest species seeds. *Seed Science and Technology*, v. 47, n. 3, p. 247–257, 2019.

PEREIRA, L. J.; SOUZA, P. V.; SILVA, A. F.; COSTA, R. V.; FRANÇA, J. B. Machine learning applied to seedling image analysis: new perspectives for seed vigor assessment. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 174, p. 105484, 2020.

SAKO, Y.; NAKAGAWA, J.; JOHNSON, D. A.; MC DONALD, M. B.; HOFFMASTER, A. L. A system for automated seed vigor assessment. *Seed Science and Technology*, v. 29, n. 3, p. 625–636, 2001.

CAPÍTULO 3

GUIA PRÁTICO PARA O USO DO SAPL®

O Sistema de Análise de Plântulas (SAPL®), tem como proposta oferecer uma metodologia objetiva, reprodutível e de baixo custo para a avaliação do vigor de sementes. O funcionamento do software exige tanto a padronização das etapas de preparo e captura de imagens quanto a correta utilização de seus comandos internos, de modo a garantir que os resultados obtidos sejam consistentes e comparáveis com métodos tradicionais (ALVES et al., 2012; BARBOSA et al., 2013).

Condução do Teste de Germinação

A primeira etapa do processo envolve a instalação e condução de um teste de germinação em condições controladas. Recomenda-se:

- **Substrato:** papel toalha ou rolo de papel Germitest®, umedecido conforme as Regras de Análise de Sementes (BRASIL, 2009);

- **Condições ambientais:** temperatura e umidade controladas de acordo com a espécie;
- **Número de sementes:** geralmente 50 a 100 unidades por repetição, permitindo boa representatividade estatística (mínimo de quatro repetições);
- **Período de germinação:** definido pela legislação ou pela prática experimental, variando de 4 a 10 dias conforme a espécie (MARCOS-FILHO, 2015). Em alguns casos, trabalhos de validação do SAPL® demonstraram que a aquisição de imagens pode ser feita de forma precoce, reduzindo o tempo necessário para o desenvolvimento de plântulas, mas isso varia de espécie para espécie.
- **Teste de germinação:** deve ser conduzido, preferencialmente, de acordo com o recomendado por Nakagawa (1999) para o teste de avaliação do comprimento de plântulas.

Preparo das plântulas e captura das imagens

Após a germinação, as plântulas devem ser cuidadosamente retiradas do substrato e dispostas em padrão

ordenado para a captura das imagens, de modo a evitar sobreposição de estruturas (Figura 3).

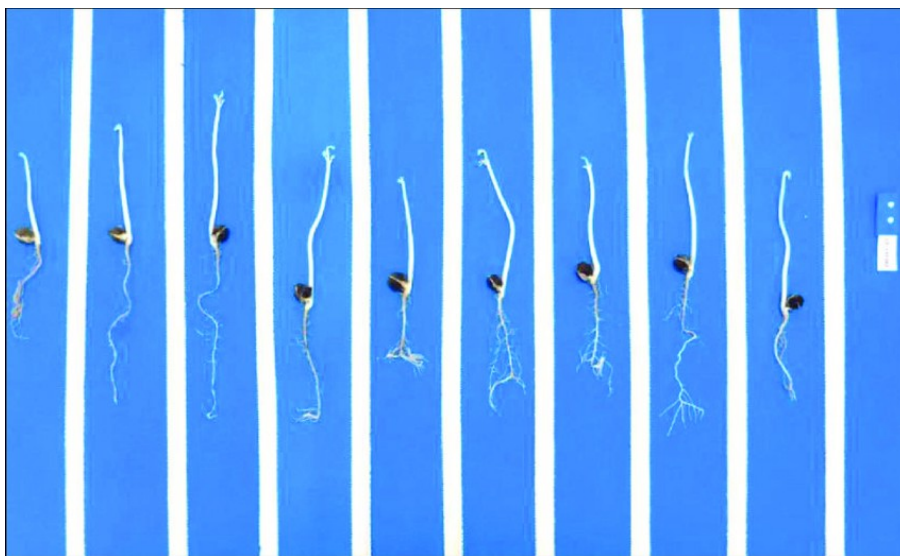


Figura 3: Fundo azul em tecido de EVA, com linhas brancas separando as plântulas em células distintas e com uma métrica (dois pontos distantes 1 cm).

A captura de imagens é um ponto crítico do processo. O SAPL® opera preferencialmente com arquivos em formatos .jpg ou .png, gerados por câmeras digitais, inclusive de smartphones ou scanners de mesa. As principais recomendações são:

- **Resolução mínima:** 300 dpi para garantir nitidez das estruturas (BARBOSA et al., 2013);
- **Fundo contrastante:** uso de tecido do tipo EVA, conforme descrito na Figura 2, para destacar as plântulas;

- **Iluminação uniforme:** evitar sombras ou reflexos que possam prejudicar o reconhecimento digital;
- **Disposição das plântulas:** alinhadas, paralelas e sem sobreposição, dentro das “células” demarcadas pelas linhas brancas, permitindo mensuração automática (SAKO et al., 2001).

Carregamento e processamento no SAPL®

Após a captura, as imagens são importadas para o SAPL®. O software realiza automaticamente a segmentação digital, identificando o contorno de cada plântula e separando as estruturas principais: raiz primária, parte aérea e comprimento total (Figura 4).

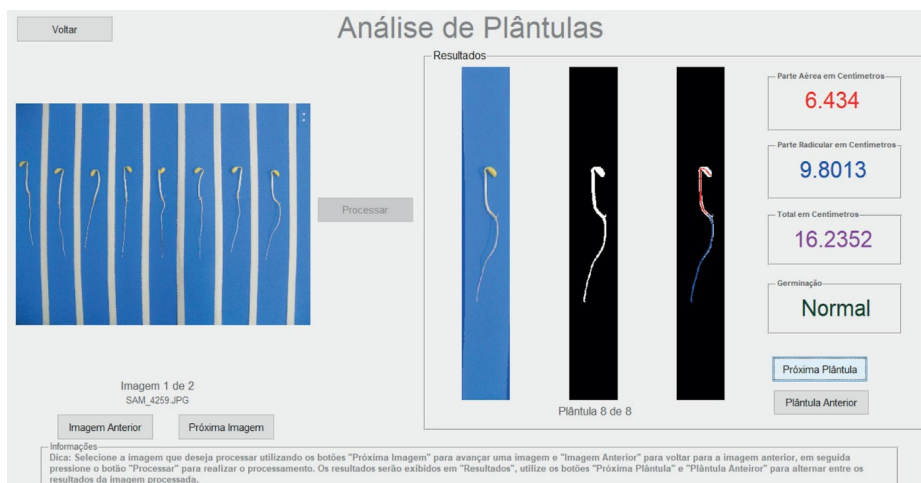


Figura 4: Interface do SAPL® evidenciando a análise da silhueta da plântula, destacando em cores diferentes os comprimentos de cada parte (aérea e radicular).

A interface do SAPL® é projetada para facilitar a manipulação das imagens, permitindo ajustes manuais em casos de falha no reconhecimento. Essa etapa é essencial, principalmente quando as plântulas apresentam curvaturas ou crescimento irregular (ALVES et al., 2012).

Principais funções do software

O sistema oferece uma série de comandos e funções, entre os quais se destacam:

1. **Reconhecimento automático** – identifica e enumera cada plântula presente na imagem;

2. **Medição** – calcula automaticamente os comprimentos da raiz, parte aérea e total;
3. **Cálculo de índices de vigor** – gera indicadores além dos comprimentos das partes das plântulas, como o índice crescimento, de uniformidade, de vigor (SAKO et al., 2001) e de vigor corrigido; Após analisar e avaliar as mudas, o software forneceu valores relacionados ao comprimento da parte aérea, raiz primária e da muda inteira, bem como índices de uniformidade, crescimento, vigor e índice de vigor corrigido. Esses índices são definidos por Sako et al. (2001), exceto pelo índice de vigor corrigido (IVC), introduzido pelos desenvolvedores do SAPL®, com base no índice de vigor adaptativo proposto por Sako et al. (2001), expresso pela seguinte equação: $IVC = (0,70 * G + 0,30 * U) * (\text{germ}/100)$, onde IVC é o índice de vigor corrigido, G o índice de crescimento, U, o índice de uniformidade e germ, a porcentagem de germinação (Figura 5).

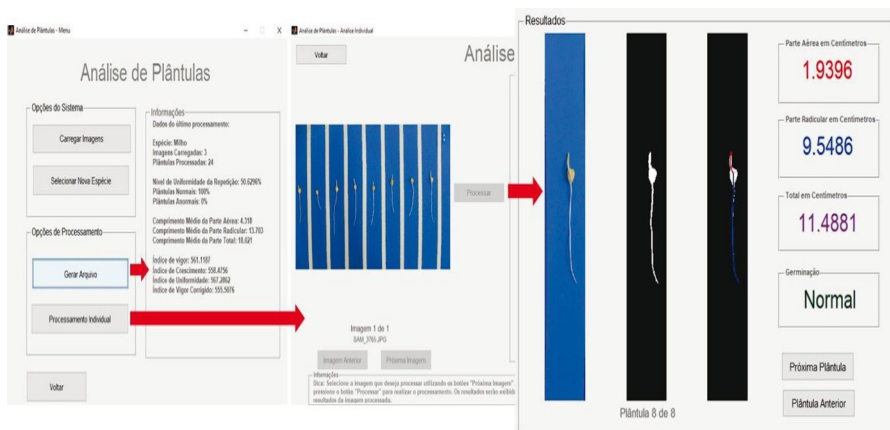


Figura 5: Processamento de imagens de plântulas de milho, evidenciando a análise de uma plântula, a determinação dos comprimentos das partes da plântula e os índices de crescimento, uniformidade, vigor e vigor corrigido.

4. **Exportação de relatórios** – salva os resultados em formato de planilha (.csv ou .xls), permitindo análises estatísticas complementares;
5. **Banco de dados** – armazena imagens e resultados, possibilitando a rastreabilidade e comparações ao longo do tempo (PEREIRA et al., 2019; PEREIRA et al., 2020).

Interpretação dos resultados e interações com os testes tradicionais

Os relatórios fornecidos pelo SAPL® incluem médias, desvios-padrão e gráficos de distribuição de crescimento, que

podem ser comparados com resultados de testes tradicionais de vigor. Estudos demonstram que os parâmetros obtidos por softwares de análise de plântulas apresentam forte correlação com testes de envelhecimento acelerado e condutividade elétrica (ALVES et al., 2012; MARCOS-FILHO; BENNETT, 2015).

Assim, a ferramenta permite validar decisões sobre qualidade de lotes de sementes, tanto em ambiente acadêmico quanto no setor produtivo.

O uso adequado do SAPL® depende da padronização da coleta e captura de imagens e do correto entendimento de seus comandos e relatórios. O sistema se configura como uma alternativa viável para laboratórios e empresas que buscam aliar inovação tecnológica a práticas de rotina em análise de sementes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, C. Z.; OLIVEIRA, L. S.; SILVA, R. C.; PEREIRA, J. T.; SOUZA, D. E. Avaliação do vigor de sementes de soja por meio da análise computadorizada de imagens de plântulas. *Revista Brasileira de Sementes*, Londrina, v. 34, n. 1, p. 63–70, 2012.

BARBOSA, R. M.; VIEIRA, B. G. T. L.; GOMES-JÚNIOR, F. G.; VIEIRA, R. D. Automated image analysis of seedling growth as a vigor test for maize seeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 95, p. 11–19, 2013. DOI: 10.1016/j.compag.2013.04.002.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Brasília: MAPA/ACS, 2009.

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

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

PEREIRA, C. E.; SANTOS, T. B.; OLIVEIRA, R. R.; COSTA, A. M.; MELO, R. S.; LIMA, K. A. P. Digital image analysis of seedlings for evaluating vigor of native forest species seeds. *Seed Science and Technology*, v. 47, n. 3, p. 247–257, 2019.

PEREIRA, L. J.; SOUZA, P. V.; SILVA, A. F.; COSTA, R. V.; FRANÇA, J. B. Machine learning applied to seedling image analysis: new perspectives for seed vigor assessment. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 174, p. 105484, 2020. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105484.

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

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E APLICAÇÕES DO SAPL® EM DIFERENTES ESPÉCIES

Resumo das validações científicas do SAPL®

A consolidação do Sistema de Análise de Plântulas (SAPL®) como ferramenta de referência para a avaliação da qualidade fisiológica de sementes decorre de sua comprovada capacidade de gerar informações objetivas, quantitativas e altamente padronizadas sobre o vigor de diferentes espécies agrícolas, florestais e nativas.

O SAPL® baseia-se em princípios modernos de morfometria digital e processamento de imagens, acompanhando as tendências internacionais de automação, inteligência artificial e fenotipagem de plântulas aplicadas à tecnologia de sementes (GOMES-JÚNIOR; CICERO, 2012; ARAÚJO et al., 2020).

Desde sua implementação, o sistema tem sido amplamente validado em experimentos envolvendo culturas de grande relevância econômica, como soja (*Glycine max*) e milho (*Zea mays*), além de espécies florestais e nativas, incluindo *Eucalyptus* spp., *Pinus* spp. e espécies da Caatinga, como *Amburana cearensis* e *Moringa oleifera* (REIS, 2016). Os

resultados apontam que o SAPL é capaz de detectar variações sutis no crescimento inicial das plântulas, frequentemente imperceptíveis à avaliação visual tradicional, tornando-se instrumento confiável para discriminar lotes com diferentes níveis de vigor.

A literatura mostra forte correlação entre os parâmetros obtidos pelo SAPL® e testes de vigor amplamente utilizados, como envelhecimento acelerado, condutividade elétrica, teste de frio e tetrazólio (MEDEIROS; PEREIRA, 2018). Em soja, variáveis como comprimento total, área da plântula e taxa de crescimento apresentaram correlação significativa com emergência em campo e índices de vigor recomendados por organismos internacionais como AOSA e ISTA (ISTA, 2023). Resultados semelhantes são relatados em milho e algodão, indicando grande potencial da análise digital para prever desempenho agrônomo com eficiência comparável e, muitas vezes, superior, aos métodos convencionais (MAKKAR et al., 2015; ZHAO et al., 2019).

No caso de espécies florestais, estudos mostram que o SAPL® pode contribuir com programas de restauração ambiental e produção de mudas, uma vez que o vigor inicial e a uniformidade do crescimento são decisivos para o estabelecimento no campo (OLIVEIRA et al., 2020; FAHAD et al., 2018). Em ambientes de estresse hídrico ou térmico, o sistema tem permitido identificar padrões de tolerância ainda na fase

inicial de desenvolvimento, oferecendo subsídios importantes a programas de manejo e melhoramento de espécies nativas da Caatinga (SANTOS et al., 2021).

A arquitetura do SAPL®, baseada em câmeras acessíveis, scanners e algoritmos de código aberto, favorece também a democratização da tecnologia no Brasil. Sua adoção por instituições públicas, escolas técnicas e laboratórios regionais contribui para modernizar a cadeia produtiva de sementes, alinhando-se a diretrizes nacionais de padronização e rastreabilidade das avaliações fisiológicas (BRASIL, 2009; ISTA, 2023).

Assim, o conjunto de resultados já obtidos aponta que o SAPL® integra um grupo de ferramentas modernas adotadas globalmente, como SVIS®, GroundEye® e plataformas baseadas em IA, destacando-se como mais uma solução nacional robusta, validada e operacionalmente eficiente.

Aplicações em espécies agrícolas

a) Soja (*Glycine max*)

Estudos conduzidos com sementes de soja mostram que o SAPL® diferencia lotes de alto e baixo vigor com sensibilidade equivalente aos testes de envelhecimento acelerado e

condutividade elétrica (MEDEIROS; PEREIRA, 2018). Parâmetros como comprimento radicular, vigor corrigido e uniformidade correlacionaram-se de forma consistente com a emergência em campo.

b) Milho (*Zea mays*)

No milho, a análise digital tem sido eficaz para avaliar velocidade de crescimento, uniformidade e desempenho inicial de plântulas. Os resultados obtidos por Medeiros et al. (2019) destacam que o SAPL® identificou diferenças de vigor entre lotes comerciais não evidenciadas pelo teste de germinação. Estudos subsequentes corroboram que a morfometria digital apresenta forte relação com testes tradicionais (MEDEIROS et al., 2018).

c) Lentilha (*Lens culinaris*)

Os trabalhos desenvolvidos por Limão (2022) demonstraram que o SAPL® é particularmente eficaz a partir do 4º dia após a sementeira, quando ocorre maior estratificação entre lotes e maior semelhança com testes de vigor tradicionais. O sistema apresentou forte relação com envelhecimento acelerado e teste de frio.

d) Grão-de-bico (*Cicer arietinum*)

Segundo os resultados obtidos por Araújo et al. (2021), o SAPL® apresentou alta correlação com testes tradicionais, especialmente teste de frio e germinação a baixa temperatura, com destaque para o índice de vigor corrigido, comprimento total e comprimento radicular. Esses parâmetros permitiram classificar os lotes já no 4º dia de avaliação, com acurácia equivalente aos métodos convencionais.

e) Moringa (*Moringa oleifera*)

O SAPL® revelou-se eficiente para avaliar o vigor de sementes de *Moringa oleifera*, possibilitando a extração de dados objetivos, como comprimento da parte aérea, comprimento radicular, comprimento total, índice de crescimento (IC), uniformidade (IU) e índice de vigor (IV). No estudo de Reis (2017), o SAPL® correlacionou-se fortemente com testes tradicionais, como IVG, massa seca, emergência e envelhecimento acelerado, confirmando sua capacidade de discriminar lotes de diferentes níveis de vigor.

Comparação entre Testes de Vigor

A Tabela 1 apresenta uma síntese comparativa entre o desempenho do SAPL® e de testes tradicionais de vigor em diferentes espécies.

Tabela 1 – Comparação do SAPL com testes tradicionais em diferentes espécies.

Espécie	Parâmetros avaliados pelo SAPL®	Teste de vigor comparado	Correlação	Referência
Soja	Comprimento radicular; IU	EA; CE	Alta	MEDEIROS; PEREIRA (2018)
Milho	Comprimento total; IC	Germinação, EA e teste de frio, CE, Emergência	Alta	MEDEIROS et al. (2018; 2019)
Lentilha	Comprimento total; IC; IU	Germinação, EA e teste de frio.	Alta	LIMÃO (2022)
Grão de bico	Comprimentos de plântula, IV	EA e teste de frio	Alta	ARAÚJO et al. (2021)
<i>Moringa oleifera</i>	Comprimento total; IC; IU; IV	Germinação; IVG; Massa seca; Emergência; IVE	Alta	REIS (2017)

*CE = Condutividade elétrica. EA = Envelhecimento Acelerado. IVG = Índice de velocidade de germinação. IVE = Índice de velocidade de emergência. IC = Índice de crescimento. IU = Índice de Uniformidade. IV= Índice de vigor.

Os resultados disponíveis na literatura apontam que o SAPL® é altamente eficiente na diferenciação de lotes de sementes e apresenta forte correlação com testes de vigor consagrados (MEDEIROS; PEREIRA, 2018). Sua vantagem está

em fornecer dados quantitativos e padronizados, reduzindo a subjetividade das análises visuais.

Além disso, o sistema mostra potencial para expandir suas aplicações a diferentes culturas e contextos, incluindo programas de melhoramento genético, certificação de sementes e análises de qualidade em espécies nativas, atendendo às demandas da agricultura sustentável.

Os estudos confirmam que o SAPL® é uma ferramenta robusta para a avaliação do vigor de sementes em diferentes espécies agrícolas e florestais, com potencial para substituir ou complementar métodos tradicionais. A capacidade de gerar dados objetivos, aliados à praticidade operacional, consolida o SAPL® como uma contribuição significativa para a inovação tecnológica em sementes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, C. Z.; BRACCINI, A. L.; SOUZA, W. R.; SCAPIM, C. A.; FAGUNDES, M. C. Avaliação do vigor de sementes de soja por meio da análise computadorizada de imagens de plântulas. *Revista Brasileira de Sementes*, v. 34, n. 1, p. 63–70, 2012.

ARAÚJO, A. S. F.; SILVA, R. F.; OLIVEIRA, L. M.; DANTAS, B. F. Image analysis in the assessment of seed vigor: advances and perspectives. *Seed Science and Technology*, v. 48, p. 45–58, 2020.

ARAÚJO, J. O.; MEDEIROS, A. D.; SILVA, Í. R. F.; CAPOBIANGO, N. P.; FLORES, M. E. P. Chickpea seed vigor evaluated by computerized seedling analysis. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 42, n. 1, p. 71–86, 2021.

BARBOSA, R. M.; VIEIRA, R. D.; SALVADOR, H.; SILVA, J. B. Automated image analysis of seedling growth as a vigor test for maize seeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 95, p. 11–19, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Regras para Análise de Sementes*. Brasília, DF: MAPA/ACS, 2009.

FAHAD, S.; HUSSAIN, S.; KHAN, F. A.; NGUYEN, M. L.; REHMAN, M.; ABBAS, A.; FAHAD, M.; SHAH, A. N.; SAEED, M. Evaluating seed quality and seedling performance using imaging techniques: a review. *Agricultural Sciences*, v. 9, p. 1234–1244, 2018.

GOMES-JÚNIOR, F. G.; CICERO, S. M. Computerized image analysis to assess seed vigor of maize. *Scientia Agricola*, v. 69, p. 49–54, 2012.

GOMES-JÚNIOR, F. G.; CICERO, S. M.; KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. B. Seed Vigor Imaging System (SVIS®) for evaluating growth and vigor in soybean seedlings. *Journal of Seed Science*, v. 36, n. 2, p. 213–221, 2014.

ISTA – INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION. *International Rules for Seed Testing*. Bassersdorf: ISTA, 2023.

KIKUTI, A. L. P.; MARCOS-FILHO, J. Métodos modernos para avaliação da qualidade fisiológica de sementes. *Revista Brasileira de Sementes*, v. 36, n. 1, p. 1–19, 2014.

LIMÃO, M. A. R. Testes de vigor, atividade enzimática e espectroscopia no infravermelho próximo em sementes de lentilha (*Lens culinaris Medik.*). 2022. 88 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2022.

MAKKAR, H.; YU, L. X.; MEYERS, B. T. Imaging-based seedling traits and their relation to maize seed vigor. *Crop Science*, v. 55, p. 1–12, 2015.

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

MEDEIROS, A. D.; PEREIRA, M. D. SAPL®: a free software for determining the physiological potential in soybean seeds. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 48, n. 3, p. 222–228, 2018.

MEDEIROS, A. D.; PEREIRA, M. D.; SILVA, J. A. Processamento digital de imagens na determinação do vigor de sementes de milho. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 13, n. 3, e5540, 2018.

MEDEIROS, A. D.; PEREIRA, M. D.; SILVA, Í. R. F.; CAPOBIANGO, N. P.; FLORES, M. E. P. Vigor de sementes de milho determinado por sistema livre de análise de imagens. *Revista Ciência Agronômica*, v. 50, n. 4, p. 1–10, 2019.

OLIVEIRA, T. B.; FERREIRA, E. D.; PIRES, R. N.; VIEIRA, R. D. Digital morphometric analysis of forest seedlings: applications for quality assessment and selection. *Tree Physiology*, v. 40, n. 8, p. 677–686, 2020.

PEREIRA, C. E.; AZEREDO, G. A.; LIMA, M. G. S.; SILVA, B. C.; LIMA, R. M. Digital image analysis of seedlings for evaluating vigor of native forest species seeds. *Seed Science and Technology*, v. 47, n. 3, p. 247–257, 2019.

REIS, J. A. V. Sistema de Análise de Plântulas (SAPL®) aplicado à avaliação da qualidade fisiológica de sementes de *Moringa oleifera* Lam. 2017. 71 f. Dissertação (Mestrado em Produção Animal) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Escola Agrícola de Jundiá, Macaíba, 2017.

SANTOS, R. C.; LIMA, P. V. P. S.; SILVA, A. R. Seedling image analysis for native species of the Caatinga biome: advances and applications. *Brazilian Journal of Botany*, v. 44, p. 701–715, 2021.

SILVA, V. N.; SIMÕES, C. M.; SOUSA, F. H. M.; MARTINS, C. C.; PEREIRA, S. B. Uso de imagens digitais na avaliação de plântulas de algodão submetidas a diferentes condições de armazenamento. *Revista Brasileira de Sementes*, v. 34, n. 1, p. 104–112, 2012.

ZHAO, Y.; HUANG, F.; ZHANG, L.; LI, X.; WEI, X.; LIU, Y. Deep learning-based seed vigor prediction in soybean. *Biosystems Engineering*, v. 178, p. 1–13, 2019.

CAPÍTULO 5

COMPARAÇÃO DO SAPL® COM OUTROS SOFTWARES DE ANÁLISE DE PLÂNTULAS

A análise computadorizada de plântulas consolidou-se como alternativa objetiva e reprodutível aos testes visuais tradicionais de vigor. Como foi tratado ao longo deste livro, o SAPL® desponta como solução gratuita e de baixo custo para mensuração do vigor a partir de fotografias de plântulas (índices de comprimento, crescimento, uniformidade e vigor) (MEDEIROS et al., 2018; REIS, 2017; PEREIRA et al., 2020).

Estudos apresentados nos capítulos anteriores reportam correlações elevadas ($r > 0,80$) entre índices do SAPL® e testes clássicos (soja, feijão, milho, moringa, etc), reforçando sua validade (MEDEIROS et al., 2018). A Figura 6 apresenta a correlação entre os resultados obtidos após o processamento das imagens de plântulas de soja pelo SAPL® e diferentes testes tradicionais e já consolidados, demonstrando a alta relação entre esses resultados.

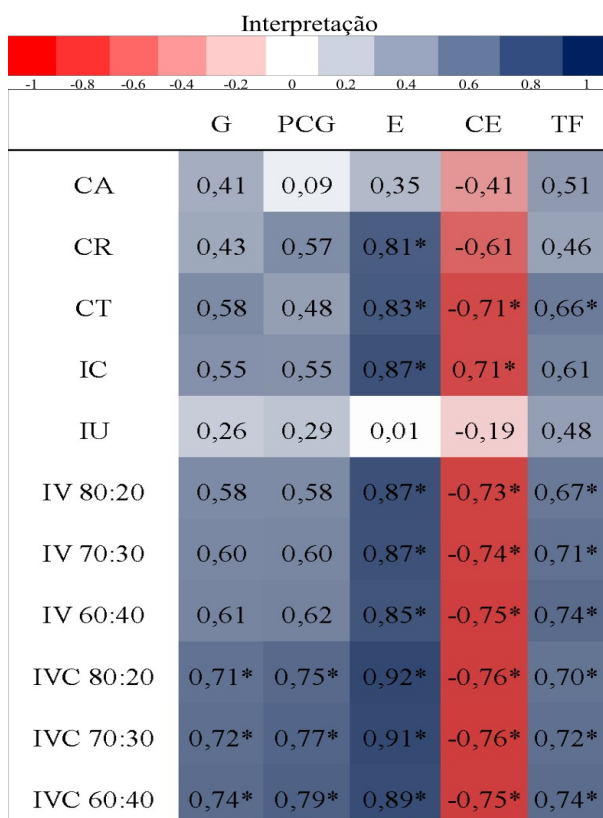


Figura 6. Correlação de Pearson entre as variáveis avaliadas pelos testes tradicionais e por análise de imagem, em sementes e plântulas de quatro lotes de soja. G: Germinação, PCG: Primeira contagem de germinação, IVG: Índice de velocidade de germinação, E: Emergência, TF: Teste de frio, CPA: Comprimento de parte aérea, CR: comprimento de raiz, CT: Comprimento total, IC: índice de crescimento, IU: Índice de uniformidade, IV: Índice de Vigor, IVC: Índice de vigor corrigido.

Panorama geral dos softwares de análise de sementes

Paralelamente ao SAPL®, o ecossistema nacional e internacional oferece outras excelentes ferramentas com escopos próximos ou complementares, desenvolvidos a partir de diferentes realidades para a análise de vigor de sementes ou adaptadas para isso, podendo-se citar o SVIS®, WinRHIZO®, SmartRoot®, GiA Roots®, PlantCV® e GERMINATOR®. Esses softwares variam quanto a finalidade (vigor a partir de plântulas, arquitetura radicular, fenotipagem geral, curvas de germinação), licenciamento, automação e requisitos de hardware.

Descrição dos principais softwares

a) SAPL® (Sistema de análise de plântulas)

O SAPL® já foi amplamente apresentado e discutido nos capítulos anteriores, no entanto, vale apresentar um resumo das suas características paralelamente a outros sistemas.

O software realiza a avaliação do vigor a partir de imagens 2D de plântulas obtidas por câmera ou scanner, extraíndo comprimento da raiz, parte aérea e total, além de índices de crescimento, uniformidade e vigor; é gratuito e foi validado em espécies como soja (correlações > 0,80 com testes tradicionais) e moringa (diferenciação de lotes de baixo, médio e alto vigor)

(MEDEIROS et al., 2018; PEREIRA et al., 2020; REIS, 2017/2020).

Há registro institucional do programa (vitrine AGIR/UFRN), descrevendo seu propósito e precisão (AGIR/UFRN).

b) SVIS® (Seed Vigor Imaging System)

O SVIS®, desenvolvido na Ohio State University, é referência pioneira em vigor por imagem, gerando índices de vigor, crescimento e uniformidade a partir de plântulas jovens (alface, milho, etc.). Publicações clássicas incluem Sako et al. (2001) e Hoffmaster et al. (2005); estudos posteriores em diferentes culturas consolidaram o método.

Este foi o sistema utilizado como base principal para o desenvolvimento do SAPL®.

c) WinRHIZO® (Regent Instruments)

O WinRHIZO® é um software comercial voltado à morfologia, topologia, arquitetura e cor de raízes lavadas e plântulas jovens (versão Arabidopsis), com módulos para análises automáticas e interativas; dispõe de versão TRON para imagens de minirrizotrons/in situ. Adequa-se a análise de vigor de sementes quando o foco principal é arquitetura radicular detalhada (comprimento, diâmetro, volume, distribuição por

classes) e não, necessariamente, vigor por plântulas como teste de rotina (Regent Instruments, 2024).

d) SmartRoot® (ImageJ® toolbox)

O SmartRoot® é um toolbox semiautomático (plug-in) para o ImageJ® que possibilita traçado e quantificação detalhada do crescimento e arquitetura radicular ao longo do tempo, com forte uso em pesquisa de fisiologia e ecofisiologia de raízes (Lobet et al., 2011). O imageJ® tem sido amplamente utilizado na análise de vigor das sementes, fornecendo valores de comprimento total de plântulas, das raízes e da parte aérea.

e) GiA Roots®

O GiA Roots® é uma ferramenta semiautomática de alta capacidade de processamento para extrair dezenas de fenótipos radiculares a partir de imagens 2D, com pipeline reprodutível e foco em arquitetura de raízes (Galkovskyi et al., 2012). O software também tem sido adaptado para seu uso na análise de sementes a partir de imagens de plântulas.

f) PlantCV®

O PlantCV® é suíte open-source (Python) para fenotipagem por imagem em múltiplas escalas, oferecendo módulos para segmentação, morfometria, aprendizado de máquina, e workflows reprodutíveis; é genérico (não exclusivo de plântulas ou para o uso na análise de sementes) e muito usado em plataformas de fenotipagem (Gehan et al., 2017; site PlantCV). Tem aplicação um pouco limitada.

g) GERMINATOR®

O software GERMINATOR® é um pacote gratuito focado em escoragem automática e ajuste de curvas de germinação em alta escala (múltiplas leituras/dia), gerando parâmetros cinéticos (t_{50} , velocidade, etc.). Pode ser usado de forma complementar ao enfoque de vigor por plântulas utilizado no SAPL® ou SVIS®, por exemplo (Joosen et al., 2010).

Critérios comparativos

a) Escopo e saída de dados

- **SAPL® e SVIS®**: orientados a vigor por plântulas em 2D, a partir de comprimentos e índices (vigor, crescimento, uniformidade). Adequam-se diretamente ao laboratório de análise de sementes.
- **WinRHIZO®, SmartRoot®, GiA Roots®**: foco em arquitetura radicular (morfologia e/ou topologia). Úteis quando o objetivo é estudo detalhado de raízes, não necessariamente a rotina de vigor.
- **PlantCV®**: plataforma ampla de fenotipagem; pode compor pipelines customizados (incluindo seedlings), mas exige configuração e programação.
- **GERMINATOR®**: curvas de germinação e métricas temporais; não mede comprimentos de plântulas.

b) Automação, custo e requisitos

- **SAPL®**: gratuito; operação em PC comum; fluxo padronizado de importação e mensuração; indicado para laboratórios de sementes.
- **SVIS®**: consolidado academicamente; requer licença (via grupos/pacotes associados); bom nível de automação.

- **WinRHIZO®**: comercial, diversos módulos e hardware sugerido (scanners dedicados), com alta precisão e amplo conjunto de métricas.
- **SmartRoot/GiA® Roots/PlantCV®**: open-source; maior flexibilidade e curva de aprendizado; demandam ajustes de workflow e, por vezes, intervenção do usuário.
- **GERMINATOR** pipelines : gratuito e escalável para muitas placas/leituras por dia, com baixo custo e automação do scoring.

Evidências científicas (validação)

a) SAPL®

O avanço das técnicas de fenotipagem digital tem consolidado esses diferentes sistemas para avaliação do vigor de sementes e a comprovação e validação de sua eficiência, por meio de pesquisas e publicações de credibilidade que são fundamentais para o sucesso na utilização dessas ferramentas pelos laboratórios e produtores de sementes.

Em se tratando do SAPL®, o software se destaca como uma solução nacional robusta, acessível e cientificamente validada. Como já foi apresentado nos capítulos anteriores, os estudos conduzidos com sementes de soja, por exemplo, demonstraram que o SAPL® apresenta correlações elevadas com

testes convencionais de vigor, como condutividade elétrica, envelhecimento acelerado e emergência em campo, evidenciando sua capacidade de mensurar atributos morfológicos que refletem de forma fidedigna o desempenho fisiológico dos lotes de uma das commodities mais importantes do país e no mundo (MEDEIROS; PEREIRA, 2018).

Além disso, o SAPL® também tem comprovada eficiência de aplicações na avaliação do vigor de sementes de *Moringa oleifera* mostraram, sendo capaz de discriminar lotes com sensibilidade equivalente ou superior aos métodos clássicos, detectando diferenças sutis no desenvolvimento radicular e na uniformidade das plântulas (REIS, 2017). A literatura ainda registra a utilização do SAPL em espécies como milho, algodão, lentilha e grão-de-bico, consolidando sua presença no cenário acadêmico brasileiro como ferramenta versátil e de baixo custo para fins de pesquisa, ensino e avaliação de qualidade em laboratórios de sementes.

b) SVIS®

Paralelamente, o sistema SVIS® (Seed Vigor Imaging System®) ocupa lugar de referência internacional na análise computadorizada de vigor, contando com uma literatura extensa e consolidada.

Inicialmente desenvolvido para alface, o SVIS® foi posteriormente validado para milho, soja, algodão, beterraba e diversas outras culturas, demonstrando excelente capacidade discriminatória entre lotes, elevada reprodutibilidade e forte correlação com testes fisiológicos tradicionais (HOFFMASTER et al., 2003; GOMES-JÚNIOR et al., 2014).

Os índices gerados pelo software, como velocidade de crescimento, uniformidade e vigor, tornaram-se parâmetros amplamente aceitos em pesquisas internacionais, podendo inclusive prever emergência em campo com elevada precisão.

c) Outros softwares

Outras ferramentas digitais têm reforçado o ecossistema de análise de sementes e plântulas ao focarem em aspectos específicos do fenótipo, sendo a maioria utilizada de forma adaptada para esta finalidade.

Síntese comparativa e recomendações de uso

Softwares de análise radicular, como WinRhizo®, RootReader3D® e RhizoVision Explorer®, permitem a caracterização detalhada da morfologia e topologia do sistema radicular, gerando informações de alta precisão sobre comprimento, superfície, ramificações e arquitetura espacial,

parâmetros essenciais à compreensão do vigor inicial e da tolerância ao estresse (OLIVEIRA et al., 2020).

No campo da fenotipagem ampla, ambientes como PlantCV®, OpenCV® e ferramentas baseadas em aprendizado profundo (deep learning) vêm sendo aplicadas na extração de traços morfológicos complexos, classificação automática de plântulas e identificação de padrões associados ao desempenho fisiológico de sementes (ZHAO et al., 2019; ZHANG et al., 2022).

Esses diferentes sistemas, embora distintos em seus propósitos, são complementares. Enquanto ferramentas como PlantCV® e analisadores radiculares avançados fornecem informações profundas sobre arquitetura, biomassa e topologia, o SAPL® e o SVIS® oferecem foco direto na mensuração rápida e padronizada do vigor, utilizando imagens de plântulas, sendo ideais para rotinas de laboratório, controle de qualidade e programas de pesquisa que necessitam de precisão aliada à praticidade.

A convergência dessas tecnologias demonstra o amadurecimento da área de análise digital aplicada à fisiologia de sementes, permitindo avaliações mais integradas, robustas e alinhadas às exigências da agricultura moderna. Um resumo das principais características e diferenças entre esses sistemas pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Resumo das principais características e diferenças entre diferentes softwares utilizados para a análise de vigor de sementes a partir do vigor e desempenho de plântulas.

Software	Foco principal	Tipo de licença	Saídas centrais	Contexto ideal de uso
SAPL®	Vigor por plântulas (comprimentos + índices)	Gratuito	Comprimento raiz/parte aérea/total; índices de crescimento, uniformidade e vigor	Rotina de laboratório de sementes; ensino/pesquisa com baixo custo.
SVIS®	Vigor por plântulas (índices)	Licenciado	Índice de vigor, crescimento, uniformidade	Rotina de vigor com histórico de validação internacional.
WinRHIZO®	Arquitetura radicular e seedlings (Arabidopsis)	Comercial	Comprimento, área, diâmetro, volume, topologia; módulos TRON in situ	Pesquisa detalhada de raízes; necessidade de métricas avançadas.
SmartRoot®	Traçado semiautomático de raízes	Open-source	Dinâmica de crescimento; arquitetura (traçado)	Pesquisa acadêmica com ênfase em séries temporais/arquitetura.
GiA Roots®	Alta vazão em raízes 2D	Open-source	Dezenas de fenótipos radiculares	Triagem/HTP de arquitetura radicular.
PlantCV®	Fenotipagem ampla por imagem	Open-source	Módulos de segmentação, morfometria, ML	Pipelines customizados; multi-espécies; integração com IA.
GERMINATOR®	Curvas de germinação	Open-source	Parâmetros cinéticos (t50,	Experimentos de germinação em

(escoragem automática)	taxa, etc.)	larga escala; complementar ao vigor por plântulas.
------------------------	-------------	--

A escolha da ferramenta digital ideal para avaliação da qualidade fisiológica de sementes depende diretamente do objetivo da análise e do contexto de uso. Quando o foco é a determinação do vigor por meio da avaliação de plântulas, especialmente em rotinas de laboratório de tecnologia de sementes, os sistemas SAPL® e SVIS® figuram como as alternativas mais adequadas.

O SAPL® destaca-se pela gratuidade e acessibilidade, tendo sido aplicado com êxito em diversas espécies agrícolas e florestais, reforçando sua utilidade em instituições públicas e privadas. Já o SVIS® apresenta ampla consolidação internacional, com uma trajetória pioneira no uso de imagens para vigor em plântulas, embasada por extensa literatura científica que abrange culturas como alface, milho, soja e algodão, demonstrando alta sensibilidade e reprodutibilidade em diferentes condições experimentais.

Para estudos cujo objetivo centra-se na arquitetura radicular, especialmente em pesquisas que demandam caracterização detalhada da morfologia e da topologia das raízes,

ferramentas específicas como WinRHIZO®, SmartRoot® e GiA Roots® são mais indicadas. O WinRHIZO®, de natureza comercial, é reconhecido por sua precisão e por fornecer métricas abrangentes, incluindo comprimento total, área superficial, diâmetro, ramificação e distribuição espacial das raízes. Já o SmartRoot® e o GiA Roots®, ambos de código aberto, oferecem alternativas robustas para laboratórios acadêmicos, como os das escolas técnicas e universidades, permitindo análises sem custo elevado e com alto nível de detalhamento, embora frequentemente demandem maior intervenção manual ou maior conhecimento técnico para operacionalização.

Para abordagens mais amplas de fenotipagem, especialmente aquelas integradas a pipelines de aprendizado de máquina (machine learning), classificação automatizada e análise multivariada, o software PlantCV® tem se destacado como uma das plataformas mais completas e versáteis. Por ser modular, open-source e altamente customizável, o PlantCV® permite a extração de uma ampla gama de características morfológicas, fisiológicas e espectrais de plântulas e plantas jovens, sendo frequentemente adotado em estudos que buscam correlacionar características fenotípicas com desempenho agrônomo, tolerância a estresses e variabilidade genética.

Quando o objetivo passa a ser o monitoramento em larga escala da germinação, incluindo análises temporais (tempo × crescimento) e curvas completas de desenvolvimento, o software GERMINATOR® apresenta vantagens significativas. Sua proposta não é substituir os testes de vigor por plântulas, mas complementá-los, oferecendo avaliação precisa da dinâmica germinativa, cálculo automatizado de índices e possibilidade de comparação entre lotes sob diferentes condições ambientais. Assim, o GERMINATOR® se insere como ferramenta estratégica em protocolos que exigem acompanhamento do processo germinativo ao longo do tempo, com utilidade particular em pesquisa, melhoramento e testes de lotes submetidos a estresses.

Em síntese, o cenário atual de análise digital de sementes demonstra que não existe uma única ferramenta universalmente superior; ao contrário, cada sistema atende a demandas distintas. Enquanto SAPL® e SVIS® são mais apropriados para o vigor via plântulas, WinRHIZO® e ferramentas radiculares atendem análises morfológicas específicas, PlantCV® se destaca na fenotipagem integrada a dados avançados, e GERMINATOR® complementa avaliações voltadas à dinâmica germinativa.

Essa diversidade de ferramentas reflete a evolução da área e possibilita análises cada vez mais completas, precisas e alinhadas às necessidades da agricultura moderna.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA DE INOVAÇÃO DA UFRN – AGIR. Sistema de Análise de Plântulas – SAPL: descrição institucional. Natal: AGIR/UFRN, 2020.

GALKOVSKIY, T.; FASANIELLO, C.; JOORIS, M.; SÉGÉLA, M.; LOBET, G.; PRIDMORE, T.; DRAYE, X. GiA Roots: software for the high throughput analysis of plant root system images. *BMC Plant Biology*, v. 12, p. 116, 2012.

GEHAN, M. A.; FULDNER, D.; MARON, L. G.; WOOD, J. C.; RICHARDS, C.; LIANG, Z.; REDDY, S. K.; MOCKLER, T. C. PlantCV v2: image analysis software for high-throughput plant phenotyping. *Plant Methods*, v. 13, p. 80, 2017.

HOFFMASTER, A. F.; XU, L.; FUJIYAMA, P.; BENNETT, M. A.; EVANS, M.; STILL, D. W. The Ohio State University Seed Vigor Imaging System (SVIS®). *Seed Science and Technology*, v. 33, n. 3, p. 701–713, 2005.

JOOSEN, R. V. L.; ARENDS, D.; LIGNY, F. M. J. D.; WILLEMS, L. A. J.; KEURENTJES, J. J. W.; LOUWERSE, W.; HILHORST, H. W. M.; LIGTERINK, W. GERMINATOR: high-throughput scoring and curve fitting of Arabidopsis seed germination. *The Plant Journal*, v. 62, n. 1, p. 148–159, 2010.

LOBET, G.; PAGÈS, L.; DRAYE, X. SmartRoot: a semi-automated toolbox to measure root growth and architecture. *Plant Physiology*, v. 157, n. 2, p. 954–964, 2011.

MEDEIROS, A. D.; PEREIRA, M. D.; SILVA, J. A. SAPL®: a free software for determining the physiological potential in soybean seeds. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 48, n. 3, p. 222–228, 2018.

PEREIRA, M. D.; CAVALCANTE, D. A.; OLIVEIRA, J. P. S.; SOUZA, R. A. Processamento digital de imagens de plântulas para avaliação de vigor em sementes florestais. *Ciência Florestal*, v. 30, n. 2, p. 460–472, 2020.

REGENT INSTRUMENTS INC. WinRHIZO 2024: root morphology and architecture analysis system. Quebec City: Regent Instruments, 2024.

REIS, J. A. V. Sistema de Análise de Plântulas (SAPL) aplicado à determinação do vigor de sementes de *Moringa oleifera* Lam. 2017. 71 f. Dissertação (Mestrado em Produção Animal) – Escola Agrícola de Jundiá, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, 2017.

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

SOBRE O AUTOR

Márcio Dias Pereira é Engenheiro Agrônomo, graduado pela Universidade Federal do Espírito Santo (2004), e Mestre e Doutor em Fitotecnia (Produção Vegetal) pela Universidade Federal de Viçosa (2007 e 2011). É Professor Associado da

Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias (EAJ), da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), onde atua no ensino, na pesquisa, na inovação e na extensão nas áreas de produção, tecnologia e fisiologia de sementes.

Na graduação, coordena e ministra os componentes curriculares Produção e Tecnologia de Sementes, no curso de Agronomia, e Sementes Forrageiras, no curso de Zootecnia, além de atuar no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, no qual é responsável pela disciplina Análise de Sementes Florestais e orientador. É coordenador do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Sementes da EAJ-UFRN e professor orientador do Grupo de Estudos em Tecnologia de Sementes (GETSem), contribuindo para a formação de estudantes de níveis técnico, graduação e pós-graduação.

Integra a Comissão de Sementes e Mudas do Estado do Rio Grande do Norte e atua como Editor de Seção do *Journal of Seed Science (JSS)*. Suas pesquisas concentram-se no desenvolvimento de softwares para automatização da análise de sementes, no processamento digital de imagens aplicado à avaliação do vigor e na utilização do plasma atmosférico como método para superação de dormência tegumentar em sementes florestais.

Autor de mais de setenta artigos científicos publicados em revistas nacionais e internacionais, possui ainda livros e capítulos de livros publicados, além de participação frequente em eventos científicos no Brasil e no exterior.

ISBN 978-655376535-1



9

786553

765351