



ANA PAULA LEITE DE MENDONÇA

**IMAGEM DIGITAL PARA RÁPIDA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL
DE GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE CAFÉ**

**LAVRAS-MG
2023**

ANA PAULA LEITE DE MENDONÇA

**IMAGEM DIGITAL PARA RÁPIDA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE
GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE CAFÉ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/ Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Pesq. Dra. Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa
Orientadora

Pesq. Dra. Dayliane Bernardes de Andrade
Coorientadora

Profa. Dra. Raquel Maria de Oliveira Pires
Coorientadora

**LAVRAS-MG
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Mendonça, Ana Paula Leite de.

Imagem digital para rápida avaliação do potencial de
germinação de sementes de café / Ana Paula Leite de Mendonça. -
2023.

42 p. : il.

Orientador(a): Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa.

Coorientador(a): Dayliane Bernardes de Andrade, Raquel
Maria de Oliveira Pires.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Coffea arabica. 2. Germinação. 3. Análise de imagens. I.
Rosa, Sttela Dellyzete Veiga Franco da. II. Andrade, Dayliane
Bernardes de. III. Pires, Raquel Maria de Oliveira. IV. Título.

ANA PAULA LEITE DE MENDONÇA

**IMAGEM DIGITAL PARA RÁPIDA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE
GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE CAFÉ**

**DIGITAL IMAGE FOR RAPID EVALUATION OF THE GERMINATION
POTENTIAL OF COFFEE SEEDS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/ Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 22 de agosto de 2023.

Dra. Maria Laene Moreira de Carvalho	UFLA
Dra. Marcela Carlota Nery	UFVJM
Dra. Dayliane Bernardes de Andrade	BAYER

Pesq. Dra. Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa
Orientadora

Pesq. Dra. Dayliane Bernardes de Andrade
Coorientadora

Profa. Dra. Raquel Maria de Oliveira Pires
Coorientadora

**LAVRAS-MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por ser minha sustentação e me dar forças.

Aos meus pais Andréia e Roberto, por todo sacrifício, conselhos, incentivo, confiança e apoio durante esse período.

Gostaria de agradecer também a minha orientadora, Pesquisadora Doutora Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa, pela sua disponibilidade, paciência, carinho, compreensão, incentivo e exemplo pessoal e profissional.

Agradeço as minhas coorientadoras Doutora Dayliane Bernardes de Andrade e a Professora Raquel Maria de Oliveira Pires, por toda ajuda, contribuição e dedicação, que foram fundamentais durante a realização desta dissertação.

Aos membros da “Equipe Sttela”, pelos grandes momentos compartilhados e em especial as minhas colegas Ana Luíza, Gabriela e Ana Maria, pela amizade, ajuda e motivação. Serei eternamente grata pelo apoio e irei levar vocês dentro do meu coração.

Ao meu namorado Marcos Vinícius, que apesar dos momentos difíceis sempre me incentivou e nunca me deixou desistir.

Agradeço também a Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Agronomia/Fitotecnia e ao Setor de Sementes, pela oportunidade e toda estrutura.

A empresa Tbit Tecnologia S.A. pelo auxílio e profissionalismo.

A FAPEMIG, pela concessão da bolsa de mestrado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).

A todos que de forma direta e indireta, me ajudaram a realizar este sonho.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

O cafeeiro é uma cultura de grande expressão no cenário agroindustrial brasileiro, contribuindo fortemente para a economia do país. Sua propagação é dependente de sementes de qualidade para a obtenção de mudas saudáveis e vigorosas. Para tal fim, a análise da qualidade fisiológica das sementes é fundamental e é realizada por meio de testes laboratoriais, como o teste de germinação. Apesar de ser amplamente utilizado, o teste de germinação em sementes de café é trabalhoso e demorado, levando 30 dias para a obtenção dos resultados. Reduzir o tempo de avaliação do teste é uma estratégia vantajosa, pois irá favorecer os processos da cadeia produtiva cafeeira. A análise de imagens é um método promissor, não destrutivo, rápido e não subjetivo quando comparado ao teste de germinação tradicional. Diante disso, objetivou-se investigar o potencial de germinação de sementes de café, desenvolvendo um protocolo com o equipamento GroundEye® para a redução do tempo do teste de germinação, utilizando um novo critério de avaliação. A análise do potencial de germinação foi realizada considerando-se um novo critério de avaliação de plântulas normais, definido como plântulas no estágio de *seta*. A primeira etapa foi baseada no desenvolvimento de um protocolo de avaliação por meio da configuração e treinamento do sistema de análise de imagens GroundEye® S800, para análise das plântulas de café em fase de *seta* e *não-seta* aos 12 e 15 dias após a semeadura no teste de germinação. Foram utilizados classificadores e uma rede de decisão que permitiu a classificação das plântulas nas diferentes categorias. A eficiência do equipamento foi aferida por meio da avaliação de amostras com seis diferentes proporções de plântulas em *seta* (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%) e duas épocas de análise (12 e 15 dias após semeadura). Para a segunda etapa, realizou-se uma aferição do protocolo desenvolvido, utilizando-se de amostras de dez lotes comerciais de sementes de café. As amostras foram submetidas ao teste de germinação, conforme as Regras para Análise de Sementes (RAS), e também à avaliação visual e no GroundEye® aos 12 dias (época em que o equipamento se mostrou mais eficiente na classificação das plântulas), quantificando-se as plântulas em estágio de *seta*. É possível avaliar o potencial de germinação de sementes de café por meio da técnica de análise de imagens, utilizando o critério de plântulas no estágio de *seta*, de maneira condizente com a avaliação visual. De acordo com os parâmetros da configuração e dos testes de eficiência, o GroundEye® é mais eficiente para a classificação das plântulas de café em fase de *seta* e *não-seta* nas avaliações realizadas aos 12 dias da semeadura no teste de germinação. O protocolo desenvolvido para avaliação das plântulas de café aos 12 dias subestima o real percentual de plântulas normais, sendo de interesse a aferição do protocolo para as avaliações aos 15 dias.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L. GroundEye®. Plântulas em *seta*. Avaliação da qualidade. Controle de qualidade.

ABSTRACT

Coffee is a culture of great expression in the Brazilian agro-industrial scenario contributing strongly to the country's economy. Its propagation is dependent on the quality seeds to obtain healthy and vigorous seedlings. For this purpose, the analysis of the physiological quality of the seeds is fundamental, being performed through of laboratory test, such as the germination test. Despite being widely used, the germination test in coffee seeds is laborious and time consuming, taking 30 days to obtain the results. Reducing the test evaluation time is an advantageous strategy, as it will favor the processes of the coffee production chain. The image analysis is a promising method, non-destructive, rapid and not subjective when compared to the traditional germination test. Therefore, the objective was to investigate the germination potential of coffee seeds, developing a protocol with the GroundEye[®] equipment for the reduction of germination test time, using a new evaluation criterion. The germination potential analysis was performed considering a new criterion for evaluation of normal seedlings, defined as seedlings in the *arrow* stage. The first stage was based on the development of an evaluation protocol through the configuration and training of the GroundEye[®] S800 image analysis system, for the analysis of coffee seedlings in the *arrow* and *no-arrow* phase at 12 and 15 days after of sowing in the germination test. Classifiers and a decision network were used to allow the classification of seedlings into different categories. The efficiency of the equipment was measured by evaluating samples with six different proportions of seedlings in *arrow* (0%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100%) and two times of analysis (12 and 15 days after sowing). For the second stage, a measurement of the developed protocol was performed, using samples from ten commercial lots of coffee seeds. The samples were submitted to the germination test, according to the Rules for Seed Analysis (RAS), and also to the visual evaluation and in the GroundEye[®] at 12 days (time when the equipment was more efficient in classifying seedlings), quantifying the seedlings in the *arrow* stage. It's possible to evaluate the germination potential of coffee seeds through the technique of image analysis, using the criterion of seedlings at the *arrow* stage, such as in a visual evaluation. According to the parameters of the configuration and efficiency tests, GroundEye[®] is more efficient for the classification of coffee seedlings in the *arrow* and *non-arrow* phase in the evaluations performed at 12 days of sowing in the germination test. The protocol developed for evaluation of coffee seedlings at 12 days underestimates the real percentage of normal seedlings, being of interest the protocol mensuration for the evaluations at 15 days.

Keywords: *Coffea arabica* L. GroundEye[®]. Seedlings in *arrow*. Quality evaluation. Quality control.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
2.1	Caracterização de sementes de café.....	10
2.2	Avaliação da qualidade fisiológica de sementes de café	11
2.3	Imagens digitais.....	14
2.3.1	Processamento de imagens digitais.....	14
2.4	Análise de imagens em sementes e plântulas	16
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1	Local e obtenção das sementes	18
3.2	Desenvolvimento do protocolo para análise de plântulas de café.....	19
3.2.1	Caracterização do lote de sementes	19
3.2.2	Análise de imagens	19
3.2.3	Análise dos resultados.....	22
3.3	Aferição do protocolo desenvolvido em variados lotes de sementes.....	22
3.4	Delineamento experimental e análise estatística	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1	Desenvolvimento do protocolo para análise de plântulas de café.....	23
4.1.1	Caracterização inicial do lote de sementes.....	23
4.1.2	Configuração do sistema.....	24
4.1.3	Eficiência do sistema	25
4.2	Aferição do protocolo desenvolvido em variados lotes de sementes.....	27
5	CONCLUSÕES	35
	REFERÊNCIAS	36
	ANEXOS.....	41

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura é uma atividade agrícola de grande importância no cenário nacional e internacional, sendo responsável por expressiva movimentação de recursos financeiros e pela geração de empregos. Além disso, é uma atividade que auxilia no desenvolvimento de diversas regiões do Brasil, já que o país se destaca como um dos principais países produtores de café (CONAB, 2022).

A estimativa da produção total brasileira para a safra de 2023 é de 54.742,9 mil sacas de café beneficiado, o que representa um aumento de 7,5% em relação ao resultado da safra anterior. A área destinada a essa produção é de 2,25 milhões de hectares e a produtividade média nacional prevista é de 29,2 sacas por hectare, valor 5,7% maior em relação à safra de 2022. Apesar de ser um ano caracterizado pela bienalidade negativa, a previsão inicial demonstra uma produção superior as últimas safras, quebrando o ciclo de evolução da série (CONAB, 2023).

O sucesso cafeeiro depende, em sua grande maioria, da obtenção de sementes de qualidade para a implantação da cultura por meio de mudas vigorosas. Neste contexto, a análise da qualidade fisiológica é de extrema importância para a comercialização das sementes e posterior certificação de mudas sadias e com alto vigor, as quais darão origem a lavouras mais robustas e produtivas. A análise de sementes é uma atividade obrigatória no Sistema Nacional de Sementes e Mudas (SNSM), com a finalidade de determinar a identidade e a qualidade de uma amostra por meio de métodos padrões já estabelecidos.

No caso de sementes de café, as Regras para Análise de Sementes (RAS) estabelecem o prazo de 30 dias para a avaliação e emissão do Boletim de Análise por meio do teste de germinação. Este período para a obtenção dos resultados é considerado longo, o que pode atrasar a comercialização das sementes e conseqüentemente prejudicar a produção das mudas. Sendo assim, é altamente favorável a redução do tempo do teste, proporcionando maior flexibilidade, autonomia e segurança nas atividades de produção, fiscalização, comercialização e uso das sementes. A antecipação do processo de produção das mudas pode ser favorecida com a elaboração de técnicas mais rápidas para a aferição da qualidade das sementes, o que irá auxiliar na tomada de decisão em relação ao destino dos lotes, além de contribuir para o desenvolvimento das mudas em épocas mais adequadas para o plantio.

É constante a busca por alternativas para acelerar o processo de avaliação da qualidade de sementes de café. O tetrazólio é um teste utilizado nos laboratórios de análise para a determinação rápida da viabilidade de sementes de café, fornecendo resultados que são

utilizados como subsídio para a caracterização e comercialização dos lotes. Apesar das vantagens, tem sido constatado que o teste de tetrazólio pode superestimar a qualidade das sementes. Sendo assim, é importante o desenvolvimento de técnicas que forneçam resultados objetivos e condizentes.

Alguns estudos evidenciam que todas as estruturas de uma plântula de café podem ser identificadas em um período inferior ao de 30 dias, proporcionando rapidez na aquisição dos resultados. Com esta alternativa, há a possibilidade de que por volta do décimo segundo dia após a semeadura no teste, estágio em que a plântula apresenta um aspecto de *seta*, seja possível avaliar e atestar o potencial germinativo dessas sementes, permitindo uma redução significativa no tempo de avaliação (GUIMARÃES *et al.*, 2013; ROSA; MCDONALD JR., 2011).

Além da rapidez, espera-se que as metodologias alternativas para a avaliação da qualidade de sementes de café sejam também eficientes e seguras. Diante disso, a avaliação de sementes e plântulas de várias espécies por meio da análise de imagens tem sido amplamente estudada e vem apresentando resultados promissores para a automação da avaliação da qualidade, com potencial também para reduzir o tempo necessário para a obtenção dos resultados. O GroundEye® se destaca como um equipamento nacional de análise de imagens de alta resolução, capaz de extrair informações de sementes e plântulas e processar os dados obtidos em forma de gráficos, tabelas e histogramas, facilitando a interpretação dos resultados. A avaliação da qualidade de sementes por meio desse equipamento possui vários benefícios por ser uma técnica não destrutiva, rápida e objetiva quando comparada a outros métodos de avaliação realizados nos laboratórios.

No entanto, para a cultura do café são escassos estudos que utilizem equipamentos de análise de imagens para a avaliação da qualidade fisiológica das sementes, sendo ainda necessárias, pesquisas científicas que desenvolvam e validem metodologias confiáveis e precisas. Desta forma, o objetivo neste trabalho foi investigar o potencial de germinação de sementes de café, desenvolvendo um protocolo com o equipamento GroundEye® para a redução do tempo do teste de germinação, utilizando um novo critério de avaliação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Caracterização de sementes de café

O café é uma planta perene pertencente à família Rubiaceae e ao gênero *Coffea*, sendo este representado por mais de 120 espécies, destacando-se economicamente o *Coffea arabica* L. e *Coffea canefora* Pierre (DAVIS *et al.*, 2011). A espécie cafeeira mais cultivada no mundo é a *C. arabica*, devido a sua maior qualidade de bebida, caracterizada como de aroma acentuado e sabor adocicado quando comparado a outras espécies do gênero (SOUZA *et al.*, 2004).

O fruto do café é classificado como uma drupa que apresenta dois *locus* e duas sementes. Esses frutos são compostos pelo exocarpo (casca), mesocarpo (mucilagem) e pelo endocarpo coriáceo (pergaminho). Já as sementes são constituídas pelo espermoderma (película prateada), pelo endosperma (tecido de reservas contendo proteínas, lipídios e minerais) e um pequeno embrião localizado na superfície convexa da semente que contém um eixo embrionário diferenciado e dois cotilédones cordiformes aderentes (ROSA *et al.*, 2010).

Sementes de café possuem sensibilidade a dessecação e a baixas temperaturas, sendo classificadas inicialmente como recalcitrantes (KING; ROBERTS, 1979) e posteriormente consideradas como intermediárias, devido a capacidade de tolerar níveis de dessecação relativamente mais baixos em relação as sementes recalcitrantes e não tolerarem perdas de água extremas como as sementes ortodoxas (DUSSERT *et al.*, 2003). Esse fato dificulta a sua conservação a longo prazo, já que essas sementes perdem a viabilidade em curtos períodos de armazenamento (DUSSERT *et al.*, 2006).

Também possuem uma germinação lenta e desuniforme, além da baixa velocidade no processo de retomada do crescimento do embrião (COELHO *et al.*, 2015). Características relacionadas ao desenvolvimento, maturação dos frutos, processos de pós-colheita, possível existência de inibidores naturais e a presença do pergaminho podem ser os principais fatores responsáveis pelo atraso da germinação (CLEMENTE *et al.*, 2011). Diante disto, a obtenção de mudas de qualidade e nas condições ideais para o plantio é dificultada nas principais regiões produtoras de café do Brasil (ROSA; MCDONALD JR., 2011), o que pode prejudicar a cadeia produtiva da cultura.

Sementes de café seguem o padrão trifásico de embebição (CAMARGO, 1998), sendo que a primeira fase é caracterizada pela rápida absorção de água, levando à retomada do crescimento do embrião. Na segunda fase, a absorção de água é praticamente nula, ocorrendo o transporte ativo de substâncias em direção ao tecido meristemático. O súbito aumento de água é observado no final dessa etapa, podendo as sementes atingirem uma umidade de 40% a 60%.

Já a terceira fase se refere ao crescimento do eixo embrionário, ocorrendo a reorganização de substâncias desdobradas em compostos de maior complexidade e aumento na atividade bioquímica, culminando com a protrusão radicular (GUIMARÃES, 2012).

A faixa ótima para germinação de sementes de café está entre 25°C a 35°C, sendo que temperaturas acima de 35°C são prejudiciais, podendo inibir por completo o processo (BAUMANN; GABRIEL, 1984). Em laboratório recomenda-se a temperatura de 30°C, verificando-se que nessas condições a protrusão da radícula inicia-se em torno do quinto dia e que no décimo quinto dia de embebição, a maioria das sementes se encontram germinadas (SILVA, 2002).

De acordo com estudos desenvolvidos por Rosa e McDonald Jr., (2011), o processo germinativo da cultura do café possui oito fases distintas, que são baseadas nas mudanças das etapas de embebição, protrusão radicular e crescimento das plântulas. As fases iniciais são caracterizadas pela completa embebição das sementes (*Imbibition-1*, I-1), protuberância visível, mas sem o rompimento da camada externa do endosperma (I-2) e protrusão radicular propriamente dita (*Germination*, G). As demais etapas são compreendidas pela emergência do hipocótilo apresentando forma de *seta* (Seedling-1, S-1), aparição dos primórdios das raízes laterais junto a região do colo (S-2), crescimento das raízes laterais no colo e desenvolvimento de pelos absorventes na raiz primária (S-3), raízes primárias e laterais bem desenvolvidas (S-4) e por fim, folhas cotiledonares abertas e sistema radicular desenvolvido (S-5).

Sendo assim, o conhecimento do comportamento das sementes de café, para que as mesmas possam ser adquiridas com um alto potencial fisiológico é essencial para a obtenção de mudas saudáveis e vigorosas. Para isso, é necessário a disponibilidade de técnicas e tecnologias rápidas, objetivas e eficientes para a avaliação de sua qualidade.

2.2 Avaliação da qualidade fisiológica de sementes de café

Apesar dos esforços realizados para a viabilização da multiplicação vegetativa de plantas de café, elas ainda são propagadas por meio de mudas produzidas a partir da semeadura direta de sementes (ROSA; MCDONALD JR., 2011). Levando em consideração a importância do insumo sementes na cadeia produtiva cafeeira, é necessário que estas sejam adquiridas com alto vigor e alta porcentagem de germinação, para maior eficiência e menores perdas no processo produtivo (SOARES *et al.*, 2019).

No Sistema Nacional de Sementes e Mudas (SNSM), a avaliação da qualidade fisiológica de sementes de café é realizada pelo teste de germinação, que se baseia no processo

germinativo em condições ideais, permitindo observar o desenvolvimento de todas as estruturas essenciais da plântula, demonstrando sua aptidão em produzir uma planta normal no campo. Este teste determina o potencial máximo de germinação de um lote de sementes sob condições ideais de cultivo e pode ser utilizado para comparar a qualidade de diferentes lotes e também estimar qual será o desempenho destas sementes no campo (BRASIL, 2009).

O teste de germinação de sementes de café é realizado em rolo de papel ou entre areia, sob uma temperatura de 30°C (BRASIL, 2009). A primeira contagem ocorre no décimo quinto dia após a semeadura e a avaliação final é realizada no trigésimo dia, computando-se as plântulas normais que demonstram capacidade de desenvolver plantas normais quando submetidas a condições favoráveis de cultivo (BRASIL, 2009). Nestas circunstâncias, são consideradas plântulas normais aquelas que possuem todas as suas estruturas essenciais completas, bem desenvolvidas, sadias e proporcionais, e/ou que apresentam pequenos defeitos que não interfiram no seu crescimento.

A avaliação da qualidade fisiológica de sementes de café por meio do teste de germinação é uma etapa minuciosa e demorada, o que pode atrasar a comercialização e consequentemente prejudicar a produção das mudas. Deste modo, a redução do tempo de realização do teste é uma estratégia extremamente favorável, pois permite uma maior flexibilidade e autonomia nas atividades de produção, comercialização e utilização das sementes, além de contribuir para a redução de custos, mão de obra e período de ocupação de equipamentos, instalações e infraestruturas dos laboratórios de análise de sementes (CLEMENTE *et al.*, 2015).

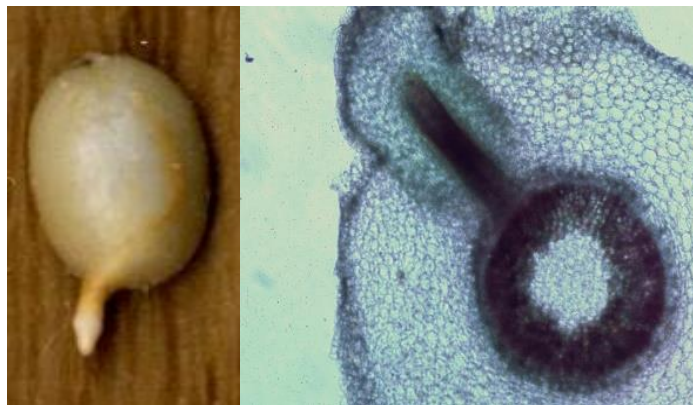
O teste de tetrazólio (TZ) é uma alternativa adotada para avaliação rápida da viabilidade de sementes de café. Ele se baseia na atividade das enzimas desidrogenases, que reagem com o sal 2, 3, 5 trifênil cloreto de tetrazólio nos tecidos vivos da semente, resultando na formação do trifênilformazam, composto vermelho e indifusível que confere cor vermelha ao tecido vivo do embrião, indicando a presença de atividade respiratória (CLEMENTE *et al.*, 2011). Apesar da técnica fornecer os resultados em um tempo estimado de 48 horas, esta exige um treinamento especializado do analista sobre as estruturas embrionárias das sementes e interpretação dos resultados, além da possibilidade de superestimação do valor germinativo do lote avaliado (FANTAZZINI, 2018).

Em busca de metodologias que possam reduzir o tempo de avaliação do potencial fisiológico das sementes de café de maneira mais confiável, estudos para a caracterização das etapas do processo de germinação de sementes de café demonstraram que é possível diferenciar todas as estruturas de uma plântula por volta do décimo quinto dia após a semeadura no teste

de germinação (GUIMARÃES *et al.*, 2013; ROSA *et al.*, 2010; ROSA; MCDONALD JR., 2011), indicando uma obtenção mais rápida dos resultados de avaliação da qualidade das sementes.

Nesses mesmos estudos, também foi demonstrada a possibilidade de que aproximadamente entre o décimo e o décimo quinto dia após a semeadura do teste, na fase em que o hipocótilo emerge e apresenta uma coloração rósea, distinta da radícula de coloração branca, apresentando um aspecto de “seta”, seja possível realizar uma previsão da formação de todas as estruturas essenciais da plântula e assim, estimar o potencial fisiológico de lotes de sementes em menor tempo do que o prescrito nas RAS (BRASIL, 2009). Essa previsão é baseada no alargamento ou protuberância da região do colo, caracterizada pela junção entre o hipocótilo e a raiz principal, que contém células em estágio inicial de diferenciação, que darão origem futuramente as raízes laterais, conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Representação do estágio de *seta* de plântulas de café em função do alargamento ou protuberância da região do colo (estágio S-1).



Fonte: Rosa e McDonald (2011).

Diante disto, a utilização de tecnologias inovadoras como a análise de imagens, podem ser uma alternativa para a avaliação da qualidade fisiológica de sementes de café, uma vez que é um teste não destrutivo e não subjetivo. Essa tecnologia aliada ao uso de um novo critério para aferir precocemente a normalidade de plântulas de café no teste de germinação, pode permitir a diminuição do tempo do teste e obtenção dos resultados, tornando o processo de análise mais rápido e eficiente.

2.3 Imagens digitais

Uma imagem é representada como uma função bidimensional $f(x, y)$, na qual x e y são coordenadas espaciais e o valor de f em qualquer ponto das coordenadas é proporcional à intensidade luminosa (brilho ou nível de cinza) naquele ponto considerado. Quando x , y e os valores de intensidade de f são quantidades finitas e discretas, chamamos a imagem de imagem digital (GONZALEZ; WOODS, 2018).

Uma imagem digital é composta por um número finito de elementos, com específicas localizações e valores, os quais são denominados pixels (GONZALEZ; WOODS, 2018). Um pixel é o elemento básico em uma imagem e normalmente se encontra na forma retangular ou quadrada. A organização de uma imagem sob a forma de uma matriz de pixels é realizada em uma simetria quadrada, devido a facilidade de implementação eletrônica pelos sistemas de aquisição ou pelos sistemas de visualização de imagens (PADILHA, 2007).

Outra característica importante das imagens digitais é que estas contem números binários codificados de modo a permitir o armazenamento, a transferência, a impressão, reprodução e o processamento da imagem por meios de dispositivos eletrônicos (JESUS; COSTA JUNIOR, 2015).

2.3.1 Processamento de imagens digitais

O processamento de imagens digitais é composto por algumas etapas que possuem o objetivo de gerar resultados precisos e confiáveis a partir do domínio do problema (GONZALEZ; WOODS, 2018). Basicamente essas etapas são compreendidas pela aquisição das imagens, realização de um pré-processamento, segmentação e a análise para a extração das informações.

A aquisição das imagens consiste em digitalizar a imagem do objeto de interesse e isso pode ser realizado com o auxílio de câmeras fotográficas, celulares, escâner ou qualquer outro tipo de equipamento que produza uma imagem (BRANDANI, 2017).

No pré-processamento das imagens, são realizadas melhorias como alteração do brilho e contraste, redução de ruídos e realce das bordas, com a intenção de corrigir os defeitos provenientes da aquisição ou realçar os detalhes importantes para a realização da análise. Essa é uma etapa importante porque ela possibilita que as próximas etapas sejam realizadas com maior eficiência (GONZALEZ; WOODS, 2018).

A segmentação é a etapa que consiste nos processos de limiarização e o reconhecimento dos objetos de interesse. A limiarização é essencial para a segmentação de imagens, pois ela

realiza a varredura da imagem original identificando os pixels pertencentes ao objeto e ao fundo, através do reconhecimento de regiões com base em mudanças abruptas de intensidade, como bordas ou pelo particionamento da imagem em regiões que são semelhantes de acordo com um conjunto de critérios predefinidos (GONZALEZ; WOODS, 2018). Na limiarização por cor, pode-se utilizar diversos modelos de cores que distinguem os pixels do objeto e os do fundo da imagem, tais como os modelos de cor RGB, HSV, CIELab e YCbCr.

O modelo RGB é representado pela combinação de intensidade das cores vermelho (R), verde (G) e azul (B), que são cores capazes de serem percebidas pelos olhos humanos (GONZALEZ; WOODS, 2018). Ele é baseado em um sistema de coordenadas cartesianas, que pode ser visto como um cubo onde três de seus vértices são as cores primárias, outros três as cores secundárias, o vértice junto à origem é o preto e o mais afastado da origem corresponde à cor branca. Além disso, este é o modelo de cor mais utilizado por câmeras e monitores de vídeos (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

O HSV (*Hue Saturation Value*) é um sistema de cores formado por uma matiz (H) que define a cor dominante de uma área, a saturação (S) que mede a quantidade de tom de cinza que a imagem apresenta e o valor (V) que está relacionado com a luminância, ou seja, a intensidade de brilho da cor (RODRÍGUEZ-PULIDO *et al.*, 2012). Dessa forma, ele permite separar as componentes de matiz, saturação e intensidade da informação de cor em uma imagem da forma como o ser humano as visualiza (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

O modelo YCbCr é usado para diminuir a redundância de maneira inerente aos sinais enviados, usando o modelo de cor RGB. O componente Y representa a luminosidade de um pixel e está dimensionado entre 0 e 1. Já os componentes de cor Cb e Cr retrata a diferença azul e a diferença vermelha. Qualquer cor RGB pode ser encontrada no eixo Cb e Cr, com o Y de luminância especificando a sombra daquela cor (GUPTA; IBARAKI, 2015).

Sobre o modelo de cor CIELab, ele pode ser entendido como uma transformação linear de coordenadas XYZ em L^* , a^* , b^* . Para qualquer sistema de cores RGB é um triângulo no diagrama cromaticidade CIE xyY (ANDRADE, 2014). A coordenada L^* representa o nível de brilho da cor, ou seja, a luminosidade, já a coordenada a^* sugere o quanto a cor é vermelha ou verde, e a coordenada b^* retrata o quanto a cor é amarela ou azul (ÁVILA, 2017).

Após todas as etapas do processamento, a imagem está pronta para ser analisada para a obtenção das informações de interesse, por meio da interpretação dos dados.

2.4 Análise de imagens em sementes e plântulas

A análise computadorizada de imagens de sementes e plântulas representa uma técnica de grande potencial para a avaliação da qualidade fisiológica de lotes de sementes (PINTO *et al.*, 2015). Os estudos voltados para a aplicação de imagens digitais no ramo sementeiro se iniciaram com o uso de softwares genéricos de processamento de imagens digitais, com o objetivo de medir o comprimento de raízes de diversas espécies (BRANDANI, 2017).

A área de processamento digital de imagens vem evoluindo continuamente ao longo dos anos, com um aumento significativo de estudos envolvendo o sistema de análise de imagens baseados em reconhecimento. Os primeiros relatos da utilização desta técnica foram nas décadas de 80 e 90 por meio de trabalhos realizados por Gunasekaran, Cooper e Berlage (1988) e Zayas, Converse e Steele (1990) que utilizaram a análise de imagens para avaliar danos provocados por patógenos e danos mecânicos em sementes de milho.

Posteriormente, Sako *et al.* (1999) desenvolveram na Universidade de Ohio nos Estados Unidos, um sistema computacional de análise de imagens de plântulas de alface, denominado *Seed Vigor Imaging System – SVIS*. Com o passar do tempo, esse sistema computacional foi utilizado com sucesso para a avaliação do vigor de diferentes lotes de sementes de café (SAMBONI, 2018; TRUJILLO; GOMES JUNIOR; CICERO, 2019; VILELA *et al.*, 2009), além da análise de sementes e plântulas de outras espécies.

Outro sistema baseado na visão computacional é o GroundEye[®], um equipamento nacional que foi desenvolvido em 2011 pela empresa Tbit Tecnologias e Sistemas com o objetivo de avaliar e classificar sementes e plântulas por meio de análise de imagens, semi-automatizando os processos de avaliação de lotes de sementes dentro do Controle de Qualidade Interno. O equipamento é composto por um módulo de captação de imagens e um software de análise próprio, onde o objeto de interesse é colocado sobre uma bandeja acrílica ou uma esteira e a imagem é capturada por uma ou duas câmeras de alta resolução, dependendo da versão utilizada.

O GroundEye[®] analisa imagens individuais e fornece informações relacionadas a coloração, textura e geometria de sementes e vigor de plântulas por meio de índices que variam de 0 a 100 (MANUAL GROUNDEYE[®], 2016). Além disso, segundo Marques *et al.* (2019) o equipamento também tem potencial para diferenciar espécies e estádios de desenvolvimento.

Neste sistema, antes da captura e análise da imagem, é necessário definir qual o padrão de fundo utilizado para a segmentação da imagem, já que a separação do objeto e do fundo é

realizada por diferença de cor, utilizando cinco opções de modelos de cor: Cielab, HSV, EBS, distância Cielab e YCbCr (MANUAL GROUNDEYE[®], 2016).

A interpretação dos dados é baseada em gráficos, tabelas, histogramas e relatórios, além de permitir o uso de ferramentas artificiais como as redes de decisão, que tem a função de direcionar o aparelho para que ele consiga extrair informações mais precisas e confiáveis (MANUAL GROUNDEYE[®], 2016). As redes de decisão utilizam de aprendizado supervisionado que fornece um modelo representado graficamente por nós ou ramos, semelhante a uma árvore, formando ramificações (LORBIESKI, 2020). A grande aplicabilidade das redes de decisão se dá devido a sua flexibilidade de utilização, robustez, facilidade de interpretação dos dados e velocidade de processamento (GARCIA, 2003), se constituindo como uma importante técnica na área de análise de imagens por auxiliar na tomada de decisões (ANDRADE, 2014).

São encontrados na literatura vários trabalhos utilizando esse tipo de sistema de análise de imagens. Andriazzi et al. (2020) avaliaram a eficiência do equipamento GroundEye[®] na determinação do vigor de sementes de milho, enquanto Catão et al. (2020) utilizaram o mesmo software para analisar plântulas de milho pipoca após a exposição das sementes a estresse salino. Também foi verificado a viabilidade de utilização desse sistema na avaliação do potencial fisiológico de sementes de milho, com a finalidade de se adequar uma metodologia de análise de imagens para a cultura (PINTO *et al.*, 2015).

Lima *et al.* (2018) utilizaram o GroundEye[®] para determinar a qualidade fisiológica de sementes de *Bowdichia virgilioides* através da eficiência do tratamento de superação de dormência desta espécie florestal. Catão e Caixeta (2017) também verificaram a aplicação deste mesmo equipamento para a detecção de alterações fisiológicas em plântulas de milho após as sementes serem submetidas a baixas temperaturas.

Há informações também, da utilização deste dispositivo para avaliação de sementes e plântulas de espécies ornamentais (MARQUES *et al.*, 2019; TANIGUCHI *et al.*, 2022); frutíferas (LUZ *et al.*, 2021); forrageiras (FREITAS *et al.*, 2021); sorgo (BATISTA *et al.*, 2022) e soja (ACHA; VIEIRA, 2020).

No entanto, não existem muitos relatos sobre o emprego deste software para a cultura do café. Abreu *et al.* (2016) avaliaram a qualidade fisiológica de sementes de café submetidas a diferentes níveis de secagem e estimaram o vigor das mudas oriundas destas sementes pela análise de imagens através do GroundEye[®]. Esses mesmos autores demonstraram que as informações de crescimento médio fornecidas pelas imagens das mudas de café obtidas pelo equipamento tiveram uma correlação positiva com a análise visual da porcentagem de

germinação, uniformidade e crescimento das plântulas aos 30 dias oriundas do teste de germinação, evidenciando que o programa seja viável e promissor para estimar a avaliação da viabilidade e vigor de sementes e mudas de cafeeiro. Esses resultados, evidenciam a possibilidade do desenvolvimento de metodologias via análise de imagens capazes de avaliar o potencial germinativo de sementes de café por meio de mudanças e/ou características morfológicas sem a necessidade da análise de plântulas normais no período estabelecido de 30 dias, conforme demonstrado nos estudos de Guimarães *et al.* (2013) e de Rosa e McDonald Jr. (2011).

De acordo com Ávila (2017), a avaliação automatizada de plântulas utilizando o equipamento GroundEye[®], reduz a subjetividade das análises baseadas na observação visual dos analistas e pode representar um avanço significativo no que diz respeito a avaliação da qualidade fisiológica das sementes por meio da análise de imagens.

Esse tipo de técnica de análise contribui para o aumento do nível de compreensão de vários aspectos relacionados a fisiologia e tecnologia de sementes e são considerados símbolos da modernidade, que devem servir como complementos importantes para a pesquisa na área sementeira. Apesar da utilização de procedimentos já padronizados, existem novas oportunidades para melhorar a metodologia dos testes tradicionais de sementes em que o foco seja a precisão, objetividade, redução do tempo de avaliação e consistência das informações fornecidas (MARCOS FILHO, 2015).

Dessa forma, a automatização da avaliação da qualidade de sementes utilizando o sistema GroundEye[®] é uma técnica eficiente, porém ainda são necessárias pesquisas que viabilizem essa prática para avaliar a qualidade fisiológica de sementes de café para a obtenção de resultados confiáveis e precisos em relação aos testes convencionais em laboratório.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local e obtenção das sementes

O experimento foi realizado no Laboratório Central de Pesquisa em Sementes (LCPS), do Departamento de Agricultura, da Universidade Federal de Lavras (UFLA), no período de julho de 2022 a julho de 2023. Num primeiro estudo referente ao desenvolvimento do protocolo digital para análise de plântulas de café, foram utilizadas sementes da espécie *Coffea arabica* L., cultivar Catuaí Vermelho, colhidas na safra de 2022 em lavouras da própria instituição de ensino. Após o desenvolvimento do protocolo, este foi aferido em um segundo estudo utilizando

dez lotes comerciais de diferentes cultivares de café e de diferentes níveis de qualidade, recebidos para análise no Laboratório de Análise de Sementes da UFLA.

3.2 Desenvolvimento do protocolo para análise de plântulas de café

Para a investigação da utilização do GroundEye® na avaliação do potencial germinativo de sementes de *Coffea arabica* L. por meio de análises digitais considerando o critério de *seta* (ROSA; MCDONALD JR., 2011), foi utilizado um lote de sementes para o desenvolvimento do protocolo e posteriormente, foram utilizadas sementes de variados lotes para a aferição desse protocolo, visando a confirmação da eficiência da avaliação do potencial de germinação.

3.2.1 Caracterização do lote de sementes

Para a caracterização do lote utilizado, foi determinada a qualidade inicial das sementes por meio da determinação do teor de água e realização do teste de germinação.

Teor de água: foi determinado pelo método de estufa a 105 °C por período de 24 horas (BRASIL, 2009). Foram utilizadas duas repetições de 5 gramas de sementes e os resultados expressos em porcentagem.

Teste de germinação: foi conduzido com quatro repetições de 50 sementes, em que a semeadura ocorreu em papel de germinação, umedecidos com água destilada na quantidade de 2,5 vezes o peso do papel seco. Os rolos contendo as sementes foram mantidos em germinador, regulado a 30°C sob luz constante (BRASIL, 2009). Foi determinada a porcentagem de protrusão radicular aos 15 dias e de plântulas normais aos 30 dias após a semeadura, sendo computadas as plântulas normais que apresentaram raiz principal, presença de pelos absorventes e pelo menos duas raízes laterais (BRASIL, 2009).

3.2.2 Análise de imagens

Após a caracterização inicial do lote de sementes, foram executadas as etapas do método de desenvolvimento do protocolo, o qual utiliza técnicas de análise de imagem computacionais.

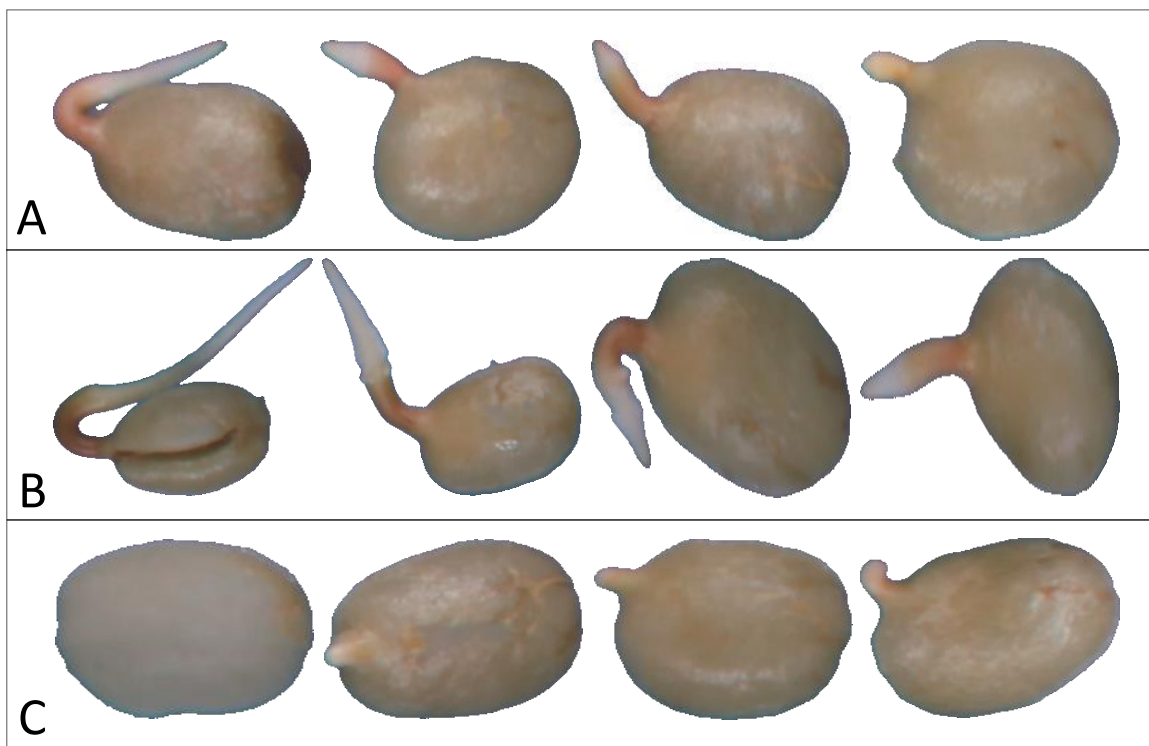
a. Captura das imagens e configuração da análise

Foram utilizadas plântulas de café da cultivar Catuaí Vermelho obtidas no teste de germinação aos 12 e aos 15 dias após a semeadura. As imagens dessas plântulas foram capturadas e analisadas pelo sistema de imagens GroundEye®, versão S800, sendo que o

material avaliado foi colocado na bandeja de análise do equipamento de forma espaçada e de maneira que todas as estruturas das plântulas pudessem ser visualizadas com precisão e nitidez.

Foram capturadas imagens das duas categorias de plântulas (fase de *seta* e fase de *não-seta*) aos 12 e 15 dias após a semeadura (FIGURA 2) e elaborada a configuração do sistema por meio da escolha do melhor modelo de cor para a classificação e a identificação do objeto de interesse. Para isso, utilizou-se o sistema de cor CIEL*a*b, em que a luminosidade apresentou valores de 0,0 a 100,0; a dimensão “a” variou entre -27,8 e 32,2; a dimensão “b” variou de -58,9 a -18,9 e o tamanho mínimo do objeto avaliado foi fixado em 0,08 cm².

Figura 2 – Plântulas de café no teste de germinação em fase de *seta* aos 12 dias da semeadura (A), aos 15 dias (B) e em fase de *não-seta* (C).



Fonte: Da autora (2023).

Após a configuração de análise para a calibração da cor de fundo, realizou-se o treinamento do sistema para o reconhecimento das plântulas em fase de *seta*.

b. Treinamento do sistema

Foi utilizada a ferramenta de inteligência artificial denominada *Classificador* e para a construção e treinamento desse classificador, foram capturadas imagens de aproximadamente

2000 plântulas em fase de *seta* e 2000 plântulas que ainda não apresentavam tal característica, aos 12 e 15 dias após a semeadura do teste de germinação. Essa quantidade de elementos para cada categoria e época de avaliação foi necessária para formar um banco de dados e com isso, tornar possível a realização do treinamento do sistema, que é constituído no aprendizado por meio da análise de um conjunto de característica das imagens.

Foram desenvolvidos e treinados diferentes tipos de classificadores que levavam em consideração características referentes a germinação, geometria e cor do material avaliado. O melhor classificador avaliado foi utilizado para a identificação e a seleção das plântulas em fase de *seta* e em fase de *não-seta*.

A partir do treinamento dos classificadores, foi desenvolvida uma *Rede de Decisão* (RD) para a separação das diferentes categorias de plântulas. Para que a RD realizasse a classificação das plântulas, foram utilizadas regras em cada saída de resposta de acordo com as características analisadas. A seguir estão descritas as regras de saídas de respostas para cada período de avaliação:

- *Para plântulas em fase de seta aos 12 dias*: afirmar que as plântulas apresentam características referentes a “seta”. (Face 1. Classificador. germinação, susan e convexa = “seeta”).
- *Para plântulas em fase de não-seta aos 12 dias*: identificar as plântulas que não apresentam nenhuma característica de “seta” tornando a afirmativa de plântulas em “seta” falsa. !(Face 1. Classificador. germinação, susan e convexa = “seeta”).
- *Para plântulas em fase de seta aos 15 dias*: identificar plântulas em fase de “seta” associando a presença da região esbranquiçada da radícula em um tamanho maior ou igual a 5 mm. ((Face 1. Classificador. germinação, susan e convexa = “seeta”) & (Fase 1. Variação de cor. Seta branca. Presença $\geq 0,05$)).
- *Para plântulas em fase de não-seta aos 15 dias*: detectar plântulas que não estão na fase de “seta” tornando falsa a afirmativa de plântulas em fase de “seta” e com a região da radícula na cor esbranquiçada. !((Face 1. Classificador. germinação, susan e convexa = “seeta”) & (Fase 1. Variação de cor. Seta branca. Presença $\geq 0,05$)).

Tanto aos 12 quanto aos 15 dias após a semeadura no teste de germinação, as RD's foram desenvolvidas com duas possibilidades de respostas: Plântulas em fase de *seta* e Plântulas em fase de *não-seta*.

c. Eficiência do sistema

Para avaliação da eficiência do protocolo desenvolvido, foram manipuladas amostras com diferentes quantidades pré-estabelecidas de plântulas na fase de *seta* e plântulas que não se encaixavam nessa categoria. Foram utilizadas 5 repetições de 25 sementes para as avaliações aos 12 e 15 dias após a semeadura no teste de germinação e os percentuais foram desenvolvidos com base no número de plântulas em *seta*: 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Os percentuais foram escolhidos a fim de atestar situações extremas, desde amostras sem nenhuma plântula em fase de *seta* até amostras compostas por todas as plântulas em fase de *seta*.

A eficiência do sistema para prever os resultados de plântulas normais foi medida pelo nível de acerto do equipamento em cada amostra com os devidos percentuais de plântulas em fase de *seta*, onde foram gerados relatórios de análise contendo os percentuais obtidos para cada categoria de plântulas.

3.2.3 Análise dos resultados

A partir dos resultados obtidos pelo teste de eficiência do sistema, foi possível calcular o percentual de erro do equipamento por meio da subtração do real percentual de plântulas em *seta* nas amostras pré-definidas com o percentual de plântulas na fase de *seta* calculado pelo próprio equipamento. Também foi obtido o percentual de acerto do GroundEye[®] por meio do complemento do erro calculado.

3.3 Aferição do protocolo desenvolvido em variados lotes de sementes

Na etapa de aferição do protocolo desenvolvido no GroundEye[®], para a avaliação das plântulas de café em fase de *seta* consideradas normais (ROSA; MCDONALD JR., 2011), foram utilizadas amostras de dez diferentes lotes comerciais de sementes de café, os quais foram recebidos no Laboratório de Análise de Sementes-UFLA. Uma vez aferido, o protocolo poderá ser indicado como um método alternativo para avaliação do potencial de germinação de sementes de café.

As amostras dos dez lotes selecionados foram submetidas ao teste de germinação, com avaliação aos 30 dias por meio da contagem de plântulas normais conforme as RAS (BRASIL, 2009), como já descrito anteriormente. As sementes das mesmas amostras foram, também, avaliadas visualmente e pelo equipamento GroundEye[®] aos 12 dias após a semeadura (tempo selecionado na etapa de desenvolvimento do protocolo, sendo o equipamento considerado mais

eficiente neste período de avaliação), quantificando-se as plântulas em fase de *seta* (ROSA; MCDONALD JR., 2011).

3.4 Delineamento experimental e análise estatística

Para o estudo da eficiência do sistema, foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado, em um esquema fatorial 6 X 2, envolvendo seis porcentagens de plântulas em *seta* nas amostras (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%) e dois tempos de avaliações (12 e 15 dias após a semeadura no teste de germinação). Os resultados obtidos foram submetidos à análise de regressão e de variância a 5% de probabilidade, sendo as médias comparadas entre si pelo teste de Tukey utilizando o software SISVAR, versão 5.6 (FERREIRA, 2019).

Na etapa de aferição do protocolo desenvolvido, os dados foram analisados em delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 10 (lotes de sementes) X 3 (métodos de avaliação visual; sistema GroundEye® e metodologia descrita nas RAS). Os dados foram submetidos à análise de variância e comparação de médias pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Foram também realizadas: análise de componentes principais (PCA) e análise hierárquica de agrupamentos, onde as variáveis foram apresentadas em mapas de cores com dendrogramas, sendo a média e a variância dos dados padronizados para 0 e 1, respectivamente. A análise dos dados foi realizada com auxílio dos pacotes *MultivariateAnalysis* (AZEVEDO, 2021) e *heatmap* (KOLDE, 2019) do programa estatístico R, versão 4.2.2 (R CORE TEAM, 2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desenvolvimento do protocolo para análise de plântulas de café

4.1.1 Caracterização inicial do lote de sementes

Na avaliação da qualidade inicial, o lote de sementes de café utilizado no estudo de eficiência do sistema apresentou um teor médio de água de 11,6%. Este valor está dentro do indicado por Hong e Ellis (1996), como tolerável para a secagem de sementes de café, ou seja, em torno de 10 a 12%. Além disso, verificou-se um valor médio de germinação de 84%, evidenciando uma alta qualidade fisiológica, considerando o percentual de 70%, que é o padrão mínimo exigido para a comercialização de um lote de sementes de café (MAPA, 2012).

4.1.2 Configuração do sistema

Para a configuração do sistema, foram treinados oito classificadores, os quais levaram em consideração características de cor, geometria e germinação das sementes e plântulas de café. O classificador com o melhor desempenho foi utilizado para desenvolver a RD responsável pela separação das plântulas em fase de *seta* e de *não-seta*.

Os classificadores desenvolvidos para análise das plântulas aos 12 dias após semeadura no teste de germinação apresentaram percentuais de acerto variando de 74,35% a 92,88%. Já para o tempo de avaliação de 15 dias após a semeadura, os valores variaram de 88,33% a 97,27%. Para ambos os períodos de avaliação, o classificador de maior nível de acerto foi o que possuía a análise das características conjuntas de cor, geometria e germinação (TABELA 1).

Tabela 1 – Percentual de acerto dos classificadores treinados para o desenvolvimento do protocolo de avaliação de plântulas de café pelo GroundEye®.

Classificador	Características	Resultado 12 dias (%)	Resultado 15 dias (%)
1	Cor e Geometria	91,32	96,29
2	Geometria (Susan e Convexa)	74,35	88,33
3	Geometria	79,33	91,84
4	Cor, Geometria e Germinação	92,88	97,27
5	Cor	90,30	95,79
6	Germinação	89,50	96,84
7	Germinação e Geometria (Susan e Convexa)	88,47	96,38
8	Germinação e Geometria (Susan)	89,29	96,52

Fonte: Da autora (2023).

No entanto, para a construção das RD's aos 12 e 15 dias, foi empregado o classificador com as características de germinação associada aos atributos de distância convexa e número de quinas por *Susan* (algoritmo de detecção de bordas em função da similaridade dos pixels das extremidades com os pixels centrais do material analisado) referentes à geometria, cujos valores de acerto foram de 88,47% e 96,38% respectivamente. Os percentuais de acerto dos classificadores construídos foram baseados em amostras homogêneas, o que pode superestimar os resultados. Sendo assim, quando foram avaliadas amostras distintas, com diferentes percentuais de plântulas em fase de *seta* e de *não-seta*, os classificadores com menores percentuais de acerto no treinamento apresentaram melhor desempenho na avaliação das plântulas em relação aqueles com altos níveis de acerto.

É importante destacar também, que o melhor grupo de características a ser utilizado é definido em função do tipo de material avaliado, já que existe uma grande variação de atributos e peculiaridades entre as culturas e em alguns casos, entre cultivares de uma mesma espécie. Esse fato foi demonstrado por Krause *et al.*, (2017), que diferentemente do encontrado nesse trabalho, determinaram que pelo mesmo sistema de análise de imagens, o conjunto de variáveis relacionadas à geometria e à coloração do objeto se constituíram na maneira mais eficiente para quantificar e identificar a diversidade genética entre genótipos de famílias de goiaba.

4.1.3 Eficiência do sistema

De acordo com a análise de variância (ANEXO A), não houve efeito significativo da interação entre os níveis de plântulas em fase de *seta* das amostras construídas (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%) e épocas de avaliação (12 e 15 dias). Sendo assim, observa-se um melhor desempenho do GroundEye® nas avaliações realizadas aos 12 dias após a semeadura no teste de germinação, sendo obtido um nível médio de acerto de 96,13% na detecção de plântulas em fase de *seta*, o que representa um aumento de 3,46% na assertividade do equipamento se comparado à avaliação realizada aos 15 dias após a semeadura (TABELA 2).

Tabela 2 – Nível de acerto do equipamento GroundEye® na detecção de plântulas em fase de *seta* nos tempos de avaliação de 12 e 15 dias da semeadura no teste de germinação.

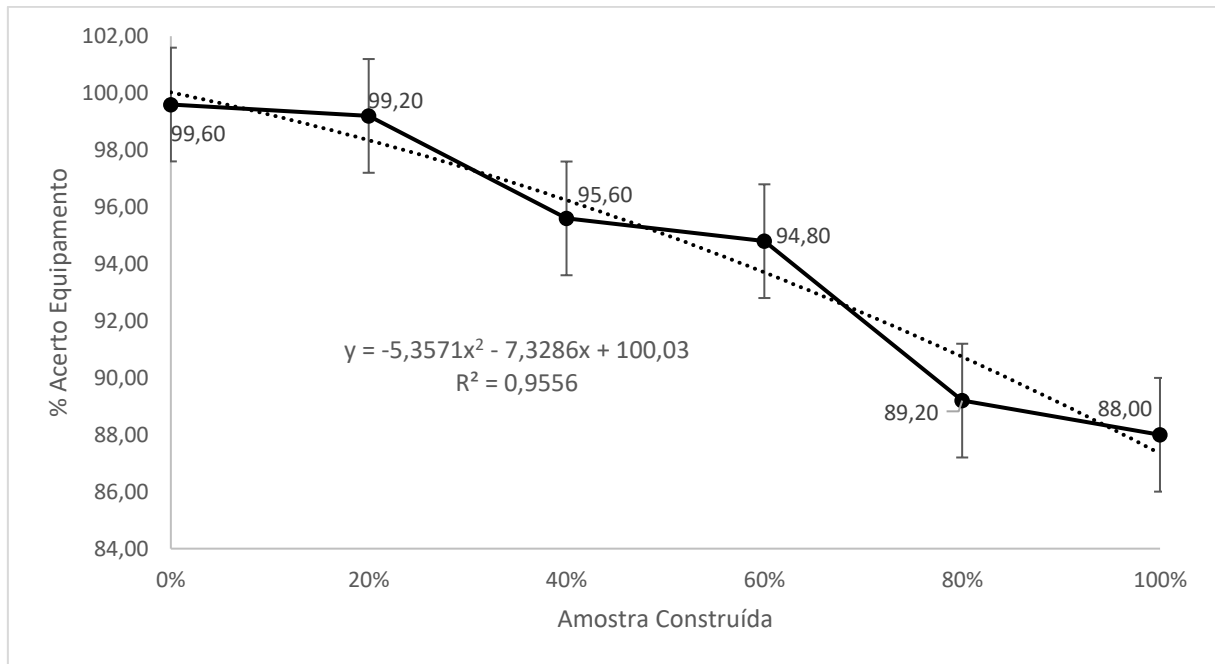
Época avaliação	% Acerto Equipamento
12 dias	96,13 a
15 dias	92,67 b
CV (%)	4,06

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Da autora (2023).

Além disso, os diferentes níveis de plântulas em fase de *seta* das amostras construídas proporcionaram efeito significativo sobre o percentual de acerto do GroundEye®, verificando uma relação inversamente proporcional, em que o nível de acerto do sistema diminuiu à medida que o número de plântulas em *seta* nas amostras pré-definidas aumentou, chegando a 89,20% de assertividade nas amostras de 80% de plântulas em *seta* e a 88% de acerto nas amostras de 100% (FIGURA 3).

Figura 3 – Nível de acerto do equipamento GroundEye® na detecção de plântulas em fase de *seta* em função das diferentes amostras pré-definidas desenvolvidas.



Fonte: Da autora (2023).

Em estudos realizados na cultura do milho (DIAS *et al.*, 2015), a avaliação de plântulas por meio da técnica de análise de imagens forneceu dados mais confiáveis do que os demais métodos de avaliação utilizados. No entanto, a diminuição proporcional da assertividade encontrada no presente trabalho, pode ser explicada pela variabilidade existente na posição das sementes de café e exposição da *seta* em relação ao endosperma das sementes, já que quanto maior a quantidade de elementos, maiores serão as chances do surgimento de plântulas em fase de *seta* com diferentes conformações. Foi percebido durante a condução do experimento, que o GroundEye® apresentou uma certa dificuldade em reconhecer e analisar as plântulas de café que possuíam a *seta* aderida ou sobreposta ao endosperma da semente (FIGURA 4), podendo estas características, ter interferido no desempenho do equipamento ao longo das avaliações.

Figura 4 – Plântulas de café obtidas do teste de germinação com as características de *seta* sobreposta e/ou aderida ao endosperma da semente.



Fonte: Da autora (2023).

Andrade *et al.*, (2016) avaliando a eficiência do equipamento SAS[®] (atual GroundEye[®]) na detecção de sementes esverdeadas de soja, encontraram que independentemente do nível de mistura (sementes esverdeadas e não esverdeadas) contido nas amostras, o sistema apresentou uma precisão de 99,51% na avaliação de sementes esverdeadas, evitando o descarte desnecessário de lotes quando comparado as técnicas de análise visual e de densidade de sementes.

Já Pinto *et al.*, (2015), utilizaram esse mesmo sistema para adequar uma metodologia de avaliação de plântulas de milho, demonstrando que a ferramenta possui um grande potencial na análise da qualidade fisiológica de sementes de milho, contribuindo para uma rápida tomada de decisão quanto ao destino dos lotes.

A análise de imagens também tem sido utilizada com sucesso para a avaliação de impurezas em amostras de sementes. Momin *et al.* (2017) obtiveram uma precisão de 96% para a separação de grãos partidos de soja e 98% para a separação de feijões defeituosos. Já nos estudos de Liu *et al.*, (2015), foi possível detectar sementes de soja danificadas por insetos com mais de 80% de precisão por meio do desenvolvimento de algoritmos com imagens digitais.

Além da eficiência, a avaliação da qualidade de sementes e plântulas pelo método de análise de imagens com o GroundEye[®] possui como principais vantagens a rapidez para a obtenção dos resultados e a praticidade, já que o material analisado pode ser colocado de forma aleatória na bandeja de análise, permitindo maior agilidade e otimização do processo, tornando possível sua utilização nas rotinas laboratoriais (ANDRADE *et al.*, 2016; ANDRIAZZI *et al.*, 2020).

4.2 Aferição do protocolo desenvolvido em variados lotes de sementes

Com a finalidade de verificar a aplicabilidade do protocolo desenvolvido em diferentes lotes de sementes de café, realizou-se o estudo de aferição. Na análise de variância (ANEXO

B) dos resultados das avaliações de plântulas normais considerando o critério de plântulas em fase de *seta* e o uso de análise de imagens digitais, houve efeito significativo entre os fatores lotes de sementes e métodos de avaliação, ou seja, avaliação em fase de *seta* nos métodos visual e GroundEye® e avaliação segundo prescrições das RAS (TABELA 3).

Em todos os métodos de avaliação, houve variação nos percentuais de plântulas normais em fase de *seta* entre os lotes de sementes. Ressalta-se que os lotes 1, 2 e 3 apresentaram médias significativamente iguais em todos os métodos de avaliação, sendo o lote 1 o de pior desempenho fisiológico, e os lotes 2 e 3, os melhores (percentuais de plântulas normais acima de 83%) em relação aos demais lotes avaliados (TABELA 3).

Tabela 3 – Porcentagem (%) de plântulas normais em fase de *seta* de diferentes lotes de sementes de *Coffea arabica*, obtidos pela análise visual e pelo GroundEye® aos 12 dias no teste de germinação e de plântulas normais aos 30 dias, de acordo com as Regras para Análise de Sementes (RAS).

Lotes	Métodos de Avaliação		
	Visual 12 dias	GroundEye® 12 dias	RAS 30 dias
1	59 Ad	57 Ac	66 Ad
2	88 Aa	85 Aa	89 Aa
3	88 Aa	83 Aa	93 Aa
4	54 Bd	46 Bd	80 Ab
5	66 Bc	64 Bc	81 Ab
6	76 Bb	72 Bb	83 Ab
7	69 Bc	63 Bc	82 Ab
8	64 Bc	58 Bc	81 Ab
9	50 Bd	44 Bd	75 Ac
10	65 Bc	62 Bc	74 Ac
CV (%)		8,67	

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Fonte: Da autora (2023).

Comparando-se os três métodos de avaliação, observa-se que os resultados de plântulas em fase de *seta* aos 12 dias no teste de germinação, avaliados pelo equipamento GroundEye®, foram significativamente iguais aos obtidos por meio da análise visual, também aos 12 dias, para todos os lotes analisados. Isso evidencia que o protocolo desenvolvido nesse sistema de análise de imagens para a avaliação de plântulas de café por meio do critério de plântulas normais em fase de *seta*, reconheceu as plântulas da mesma forma que visualmente, sendo, portanto, um protocolo bem ajustado, podendo ser considerado um método seguro e eficiente para a rotina laboratorial.

Por outro lado, esses dois métodos de avaliação (visual e por meio de imagens digitais) considerando plântulas em fase de *seta*, resultaram em percentuais inferiores aos obtidos nas avaliações aos 30 dias, conforme as prescrições das RAS. A qualidade das sementes é composta pelo somatório dos atributos genéticos, físicos, fisiológicos e sanitários, podendo variar entre os lotes devido às diferenças qualitativas presentes nas sementes, em função da interferência de inúmeros fatores que vão desde a sua formação na planta até o momento da semeadura (WEERASEKARA *et al.* 2021). Em função disso, é comum lotes de sementes possuírem qualidades fisiológicas distintas, sendo que quando classificado como de boa qualidade, o lote deve manter sua consistência independentemente da metodologia utilizada para a avaliação.

Ducournau *et al.*, (2004), avaliando a germinação de sementes de girassol por um sistema de aquisição de imagens, concluíram que a técnica fornece resultados condizentes com aqueles obtidos na análise visual realizada pelos analistas, tornando o processo de avaliação mais rápido e confiável, podendo ser considerado como uma boa alternativa para a aplicação industrial. Lurstwut (2016) também demonstrou que o sistema de análise digital foi preciso, atualizável e objetivo na avaliação da germinação de diferentes cultivares de arroz.

Os resultados fornecidos pelo GroundEye® e pela análise visual referentes ao percentual de plântulas normais em fase de *seta* aos 12 dias, foram condizentes com a avaliação de plântulas normais aos 30 dias apenas para os lotes 1, 2 e 3. Considerando que este é o método prescrito para o teste de germinação nas Regras de Análise de Sementes (BRASIL, 2009), deve recomendá-lo como referência para comparação com os testes realizados por análise de imagem, a fim de confirmar sua assertividade (ABREU *et al.*, 2016).

Pode-se afirmar então, que apesar de ser possível analisar o potencial de germinação de sementes de café por meio do sistema computacional testado no presente estudo, os resultados do percentual de plântulas em fase de *seta* aos 12 dias após a semeadura no teste de germinação não foram totalmente concordantes com os percentuais de plântulas normais aos 30 dias pela metodologia das RAS. Sete dos dez lotes não apresentaram percentuais de plântulas normais significativamente iguais nos três métodos utilizados, ou seja, a avaliação considerando o novo critério de avaliação de plântula normal, seja no método visual ou no GroundEye®, não possibilitou estimar o real valor da germinação de todos os lotes avaliados.

Em alguns trabalhos foi demonstrado que plântulas de café em estágio de *seta* é um critério confiável para a aferição precoce da normalidade das plântulas, devido ao fato de que o número de plântulas em fase de *seta* em um determinado lote de sementes se estabiliza entre 10 e 15 dias, tornando possível a previsão da formação de todas as estruturas essenciais, obtendo os mesmos valores de germinação encontrados aos 30 dias pelas RAS.

Rosa e McDonald Jr., (2011), em estudos para a definição e a descrição dos estágios do processo germinativo de sementes de café, demonstraram que por meio do modelo de crescimento das plântulas obtido, pode-se visualizar e avaliar todas as partes essenciais de uma plântula entre 12 e 15 dias após a semeadura. Tais dados indicam uma possibilidade real da redução do teste padrão de germinação, levando a uma obtenção mais rápida dos resultados.

Em estudo posterior para a redução do período do teste de germinação de sementes de café, Guimarães *et al.*, (2013) concluíram que a avaliação das plântulas no estágio de *seta* (S1) aos 16 dias após a semeadura do teste, proporciona resultados semelhantes aos obtidos pelo teste padrão prescrito pelas RAS, permitindo a redução do tempo para aferição da germinação de um lote de sementes.

O resultado do presente estudo, em que não foi possível a estimação do percentual de plântulas normais para todos os lotes de sementes, pode ser devido ao distinto comportamento dos diferentes lotes de sementes utilizados, já que sementes de café possuem uma germinação lenta e desuniforme, características estas, que podem ser mais evidentes em função da cultivar utilizada.

Por outro lado, a subestimação do potencial germinativo obtido nos métodos de avaliação mais precoces para alguns dos lotes analisados, pode também ser explicada pelos critérios de reconhecimento das plântulas em fase de *seta*, eventualmente não reconhecendo algumas plântulas como normais pelo novo critério de avaliação. Sendo assim, ainda são necessários estudos complementares, utilizando-se de maior controle em relação a identificação das plântulas em fase de *seta* e o subsequente treinamento do equipamento de análise de imagem, com a finalidade de relacionar de maneira mais precisa os resultados obtidos.

Para explicar a variabilidade dos dados obtidos no estudo, uma Análise de Componentes Principais (PCA) dos dez lotes de sementes de café foi realizada. A principal utilidade dessa análise é reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados, retendo tanta informação quanto possível num menor número de componentes principais. Trata-se de uma técnica de ciência de dados que viabiliza reduzir grande parte das variáveis de um conjunto de dados em poucos componentes principais, os quais explicam grande parte da variação dos dados. Assim, o primeiro CP é a combinação das variáveis que explica a maior proporção da variação total dos dados.

Para análise dos resultados do presente estudo, foram necessários dois Componentes Principais (CP1 e CP2) para discriminar aproximadamente 99,88% da variância total, em que o CP1 foi responsável por 88,57% e o segundo, CP2, por 11,32 % das variações dos dados (TABELA 4).

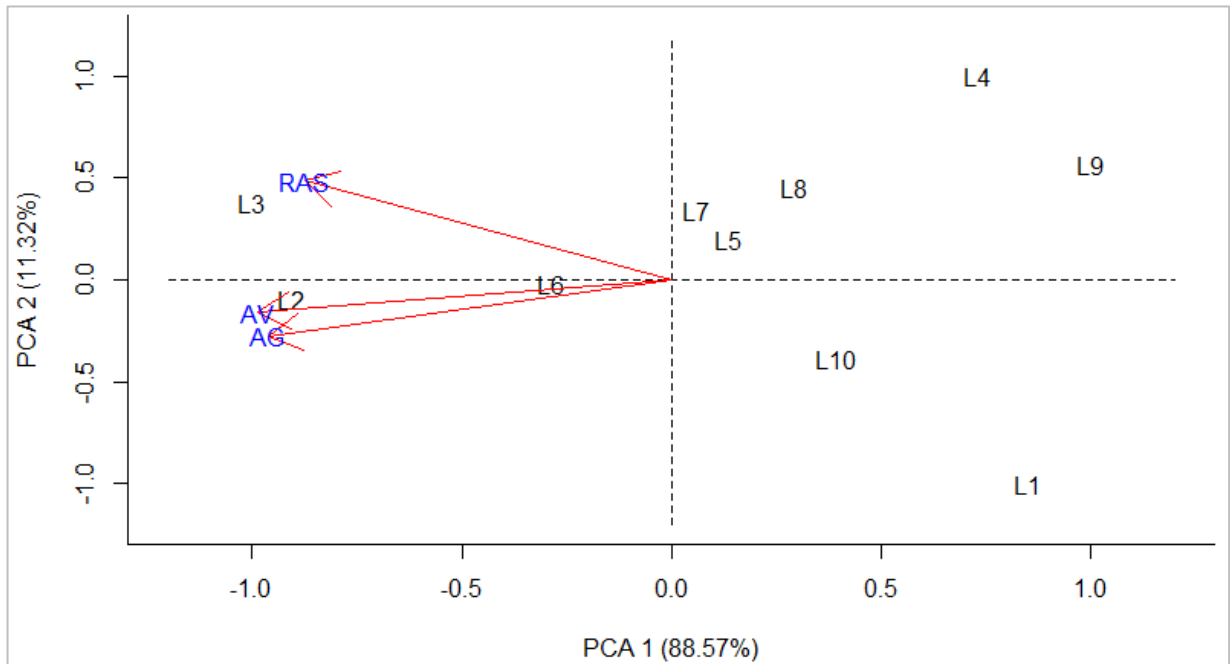
Tabela 4 – Correlação entre cada Componente Principal e os métodos de avaliação da germinação das sementes de café dos diferentes lotes.

Métodos de avaliação da germinação das sementes	Componentes Principais	
	CP1	CP2
Análise Visual	-0,99	-0,16
Análise GroundEye®	-0,96	-0,28
Regras para Análise de Sementes (RAS)	-0,87	0,49
Autovalores	2,66	0,34
Variância Explicada (em %)	88,57	11,32
Variância Acumulada (em %)	88,57	99,88

Fonte: Da autora (2023).

O poder discriminatório das variáveis em cada Componente Principal é avaliado pelo valor da correlação (HONGYU; SANDANIELO; OLIVEIRA JUNIOR, 2016). Foi verificada a tendência de agrupamento dos tratamentos e as indicações das variáveis resposta. Para os dados analisados, o primeiro Componente Principal já representa mais de 80% da variabilidade e os dois primeiros somados representam 99,89%, sendo altamente suficiente para verificação em análise gráfica *biplot*. Portanto, para o CP1 foram verificadas correlações altas e negativas ($\geq 0,70$) com os métodos analisados e por outro lado, no CP2 todas as correlações foram classificadas como baixas (TABELA 4 e FIGURA 5).

Figura 5 – Autovetores no gráfico *biplot* da análise de Componentes Principais (PCA) das avaliações por meio das Regras para Análise de Sementes (RAS), análise visual (AV) e pelo GroundEye® (AG) de dez lotes de sementes de café.



Legenda: RAS–Regras para Análise de Sementes; AV–Análise Visual; AG–Análise pelo equipamento GroundEye®; L–Lotes de sementes.

Fonte: Da autora (2023).

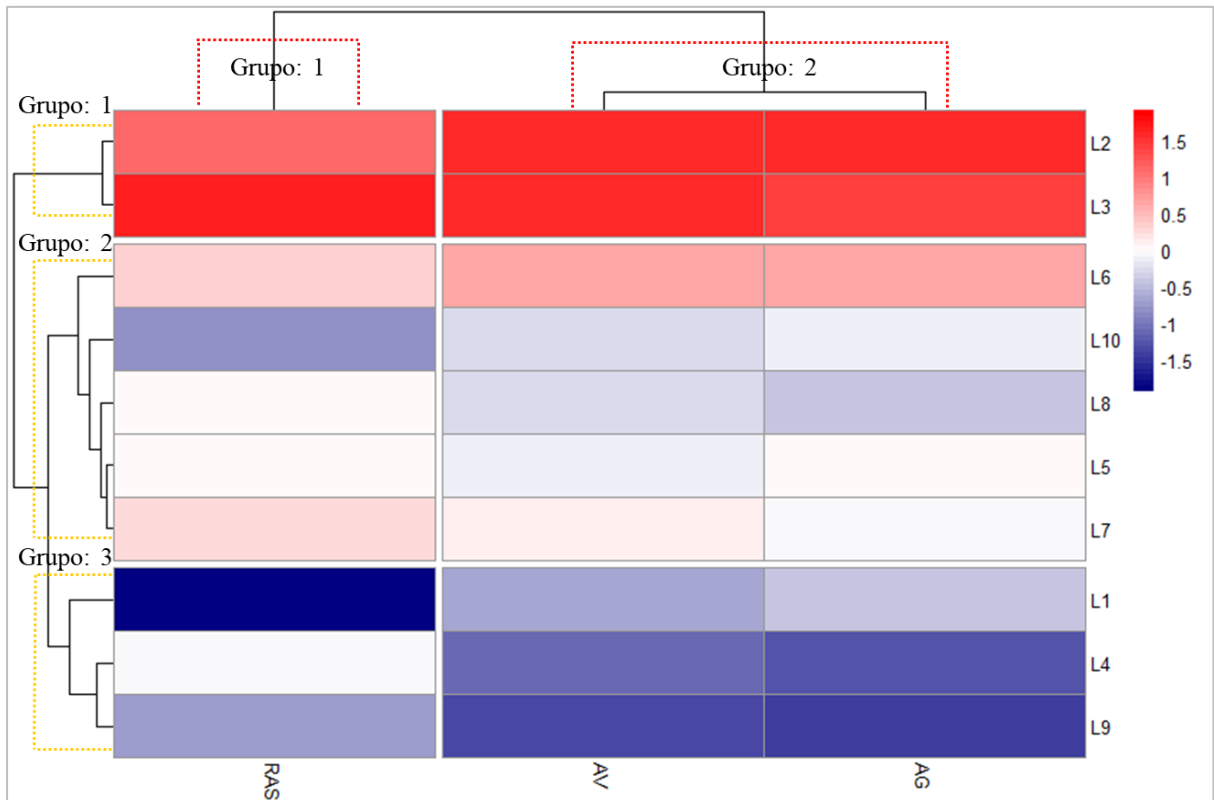
Ressalta-se ainda, que a análise visual e pelo GroundEye® tiveram maior similaridade entre si, sendo este resultado condizente com o observado nos resultados da análise de variância e teste de comparação de médias (TABELA 3). Por outro lado, estes dois métodos tiveram dissimilaridade com os critérios das RAS, uma vez que pertencem a grupos distintos na análise de Agrupamento Hierárquico (FIGURA 6), conforme foi também, observado no gráfico *biplot* (FIGURA 5).

Considerando o CP1, os tratamentos (lotes) L3 e L2 apresentam-se como semelhantes e com maior proximidade do valor -1, e os tratamentos L9, L4 e L1 apresentam-se como semelhantes com maior proximidade do valor 1, quando observado o eixo X. As variáveis possuem correlações negativas, indicadas pelas setas, mostrando tendências e correlações com os tratamentos.

De acordo com o Agrupamento Hierárquico e o mapa de cores, foram obtidos dois grupos para as os métodos de avaliação analisadas, sendo o grupo 1 formado pelas RAS e o grupo 2 pela análise visual e GroundEye®. Já em relação aos lotes, observa-se a formação de três grupos: Grupo 1 constituído por Lote 2 e Lote 3; Grupo 2 pelos Lotes 6, 10, 8, 5 e 7; e o

Grupo 3 formado pelos Lotes 1, 4 e 9 (FIGURA 6). Esses grupos formados, apresentam similaridade dentro de si e uma dissimilaridade entre os grupos.

Figura 6 – Agrupamento Hierárquico das plântulas de *Coffea* com mapa de cores detalhando a contribuição de cada método de avaliação e de cada lote analisado para a formação dos grupos.



Legenda: Cada linha é composta por um lote e cada coluna pelo tipo de método de avaliação. L: Lotes de sementes; RAS – Regras para Análise de Sementes; AV – Análise Visual e AG – Análise equipamento Groundye®. As cores representam valores, sendo: vermelho para correlações positivas e azul correlações negativas.

Fonte: Da autora (2023).

Por meio das análises multivariadas de Componentes Principais, gráfico *biplot* e Agrupamento Hierárquico, foi possível analisar a relação entre os diferentes lotes e métodos de avaliação de plântulas normais, seja aos 12 dias em fase de *seta* ou aos 30 dias pelos critérios das RAS. No Agrupamento Hierárquico (FIGURA 6), os diferentes lotes foram agrupados da mesma forma que no gráfico *biplot* (FIGURA 5), sendo que o Grupo 1 é formado pelos lotes 2 e 3 em um extremo do eixo X, e o Grupo 3 formado pelos lotes 1, 4, e 9 no outro extremo do eixo X, com o Grupo 2 composto pelos demais lotes, no centro do gráfico. Observa-se que os lotes nos grupos 1, 2 e 3, também foram classificados como de melhor, intermediário e pior desempenho fisiológico respectivamente, conforme apresentado na Tabela 3.

Ressalta-se que no estudo de aferição do protocolo desenvolvido para avaliação de plântulas de café, foi constatada um possível resultado dependente do nível de qualidade das sementes, sendo que o protocolo de 12 dias por análise de imagem apresentou porcentagem de plântulas normais significativamente iguais aos obtidos no teste de germinação prescrito pelas RAS para os lotes de melhor qualidade. Para os lotes de pior qualidade, essa igualdade não ocorreu, com o protocolo subestimando a germinação. Assim este estudo de correção entre os diferentes lotes e métodos de avaliação torna-se importante, indicando que um experimento complementar deve ser realizado com a inclusão do fator nível de qualidade.

Por outro lado, também é recomendado realizar o estudo de aferição do protocolo desenvolvido para avaliação de plântulas normais aos 15 dias, uma vez que houve uma forte tendência do protocolo de 12 dias em subestimar a germinação da maior parte dos lotes avaliados.

5 CONCLUSÕES

É possível avaliar o potencial de germinação de sementes de café por meio da técnica de análise de imagens, utilizando o critério de plântulas no estágio de *seta*, de maneira condizente com a avaliação visual.

De acordo com os parâmetros da configuração e dos testes de eficiência, o GroundEye® é mais eficiente para a classificação das plântulas de café em fase de *seta* e *não-seta* nas avaliações realizadas aos 12 dias da semeadura no teste de germinação.

O protocolo desenvolvido para avaliação das plântulas de café aos 12 dias subestima o real percentual de plântulas normais, sendo de interesse a aferição do protocolo para avaliação aos 15 dias.

REFERÊNCIAS

- ABREU, L. A. S. *et al.* Computerized analysis in the physiological quality of coffee seeds. **International Journal of Current Research**, v. 8, n. 11, p. 40820–40823, 2016.
- ACHA, A. J.; VIEIRA, H. D. Digital image processing of coated perennial-soybean seeds and correlation with physiological attributes. **Journal of Seed Science**, v. 42, n. 1, p. 1–12, 2020.
- ANDRADE, D. B. **Sistema de Análise de Sementes (SAS) na detecção de misturas varietais e de sementes esverdeadas em soja**. 2014. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.
- ANDRADE, D. B. *et al.* Detection of green seeds in soybean lots by the seed analysis system (SAS). **International Journal of Current Research**. v. 8, n. 2, p. 26462-26465. 2016.
- ANDRIAZZI, C. V. G. *et al.* Evaluation of physiological quality of corn seeds by GroundEye L800[®] system. **Revista Agro@Mambiente on-Line**, v. 14, p. 1–10, 2020.
- ÁVILA, M. A. B. **Análise de imagem na avaliação do potencial fisiológico de sementes de soja**. 2017 Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia)-Universidade Federal de Lavras, 2017.
- AZEVEDO, A. *_MultivariateAnalysis: Pacote Para Análise Multivariada_*. R package version 0.4.4. 2021. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=MultivariateAnalysis>>. Acesso em: 04 de agosto de 2023.
- BAUMANN, T. W.; GABRIEL, H. Metabolism and excretion of caffeine during germination of *coffea arabica* L. **Plant and Cell Physiology**, v. 25, n. 8, p. 1431–1436, 1984.
- BATISTA, V. A. P. *et al.* Sorghum seed coating with zinc: Physiological quality and initial performance of plants. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 44, n. 1, p. 1–10, 2022.
- BRANDANI, E. B. **Análise de imagens na avaliação do vigor de sementes de soja**. 2017 Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para Análise de Sementes (RAS)**. Brasília: 395p. 2009.
- CAMARGO, R. **Condicionamento fisiológico de sementes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.)**. 1998. Dissertação (Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1998.
- CATÃO, H. C. R. M. *et al.* Antioxidant activity and physiological performance of popcorn seed after saline stress and analysis of seedling images. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 44, p. 1–9, 2020.
- CATÃO, H. C. R. M.; CAIXETA, F. Physiological, isozyme changes and image analysis of popcorn seeds submitted to low temperatures. **Journal of Seed Science**, v. 39, n. 3, p. 234–243, 2017.

- CLEMENTE, A. C. S. *et al.* Preparo das sementes de café para avaliação da viabilidade pelo teste de tetrazólio. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, n. 1, p. 38–44, 2011.
- CLEMENTE, A. C. S. *et al.* Redução do teste de germinação de sementes de café. IX Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, **Anais [...]** Curitiba, PR, p. 24–27, 2015.
- COELHO, S. V. B. *et al.* Qualidade fisiológica de sementes de café submetidas à secagem rápida e lenta. IX Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, **Anais [...]** Curitiba, PR, p. 1–4, 2015.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira: Café. **Boletim Safra 2022**, v.9, n. 4, 53p. 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>. Acesso em: 04 de abril de 2023.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira: Café. **Boletim Safra 2023**, v. 10, n. 2, 45 p., 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>. Acesso em: 28 de junho de 2023.
- DAVIS, A. P. *et al.* Growing coffee: *Psilanthus* (Rubiaceae) subsumed on the basis of molecular and morphological data: implications for the size, morphology, distribution and evolutionary history of *Coffea*. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 167, n. 4, p. 357–377, 2011.
- DIAS, M. A. N. *et al.* 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.
- DUCOURNAU, S. *et al.* An image acquisition system for automated monitoring of the germination rate of sunflower seeds. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 44, n. 3, p. 189-202. 2004.
- DUSSERT, S. *et al.* Oxidative stress, phospholipid loss and lipid hydrolysis during drying and storage of intermediate seeds. **Physiologia Plantarum**, v. 127, n. 2, p. 192–204, 2006.
- DUSSERT, S. *et al.* Basis of coffee seed sensitivity to liquid nitrogen exposure: oxidative stress or imbibitional damage? **Physiologia Plantarum**, v. 119, n. 4, p. 534-543, 2003.
- FANTAZZINI, T. B. **Teste de Tetrazólio em café: Fisiologia e bioquímica de enzimas na estimativa da germinação de sementes.** 2018. Tese (Doutorado em Agronomia /Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2018.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.
- FREITAS, M. N. *et al.* Discrimination of *Urochloa* seed genotypes through image analysis: Morphological features. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 6, p. 4930–4944, 2021.
- GARCIA, S. C. **O uso de árvores de decisão na descoberta de conhecimento na área da saúde.** 2003. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing**. 4 Ed. New York: Pearson Education Limited. 1022p. 2018.

GUIMARÃES, G. C. **Investigação de métodos para a redução do tempo de avaliação do potencial germinativo de sementes de café**. 2012. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

GUIMARÃES, G. C. *et al.* Minimum period to assess the potential of germination of coffee seeds. **Journal of Seed Science**, v. 35, n. 3, p. 347–352, 2013.

GUNASEKARAN, S.; COOPER, T. M.; BERLAGE, A. G. Evaluating quality factors of corn and soybeans using a computer vision system. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 31, n. 4, p. 1264–1271, 1988.

GUPTA, S. D.; IBARAKI, Y. **Plant Image Analysis: Fundamentals and applications**. New York: CRC Press. 128p. 2015.

HONG, T. D.; ELLIS, R. H. **A protocol to determine seed storage behaviour**. Rome: IPGRI Technical Bulletin, n. 1, 62 p. 1996.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; OLIVEIRA JUNIOR, G. J. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **Engineering and Science**, v. 5, n. 1, p. 83-90, 2016.

JESUS, E. O.; COSTA JUNIOR, R. A utilização de filtros gaussianos na análise de imagens digitais. **Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics**, v. 3, n. 1, p. 1–7, 2015.

KING, M. W.; ROBERTS, E. H. **The storage of recalcitrant seeds: achievements and possible approaches**. Rome: IBPGR, 96 p. 1979.

KOLDE, R. `pheatmap: Pretty Heatmaps`. R package version 1.0.12. 2019. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=pheatmap>>. Acesso em: 04 de agosto de 2023.

KRAUSE, W. *et al.* Digital phenotyping for quantification of genetic diversity in inbred guava (*Psidium guajava*) families. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 1, p. 1-11, 2017.

LIMA, J. M. E. *et al.* Técnicas de análise de imagem para caracterização da qualidade de sementes de paricarana (*Bowdichia virgilioides* Kunth). **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1202–1216, 2018.

LIU, D. *et al.* Discriminating and elimination of damaged soybean seeds based on image characteristics. **Journal of Stored Products Research**, v. 60, n. 3, p. 67–74. 2015.

LORBIESKI, R. **Regionalização de área agrícola usando dados de imagens aéreas e coletas de campo**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel. 2020.

LURSTWUT, B. Rice seed germination analysis. **International Journal of Computer Applications Technology and Research**. v. 5, n. 4, p. 176-182. 2016.

LUZ, P. B. *et al.* Utilização de análise de imagem para avaliação da qualidade de sementes de *Passiflora cincinnata* (maracujá-do-mato). **Multitemas**, v. 26, n. 64, p. 123–139, 2021.

MANUAL GROUNDEYE®. **Tbit Tecnologia e Sistemas**, Lavras. 88p. 2016.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Istrução Normativa nº 35, de 29 de novembro de 2012**. Normas para a produção e comercialização de material de propagação de cafeeiro (*Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner) e os seus padrões. 2012. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/sementes-e-mudas/publicacoes-sementes-e-mudas/INN35de29denovembrode2012.pdf>>. Acesso em: 30 de março de 2023.

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

MARQUES, E. *et al.* Distinção de espécies e estádios de maturação de sementes de *Comanthera* spp. por análise de imagem e citometria de fluxo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 13–21, 2019.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: Brasport. v. 66, 331p. 1999.

MOMIN, A. *et al.* Machine vision based soybean quality evaluation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 140, p. 452–460. 2017.

PADILHA, F. R. R. **Reconhecimento de variedades de soja através do processamento de imagens digitais usando redes neurais artificiais**. 2007. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijuí, 2007.

PINTO, C. A. G. *et al.* Image analysis in the evaluation of the physiological potential of maize seeds. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 46, n. 2, p. 319–328, 2015.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. 2021.

RODRÍGUEZ-PULIDO, F. J. *et al.* Preliminary study to determine the phenolic maturity stage of grape seeds by computer vision. **Analytica Chimica Acta**, v. 732, p. 78–82, 2012.

ROSA, S. D. V. F.; MCDONALD JR., M. B. Modelo de crescimento de plântulas de café: uma justificativa para reduzir o teste padrão de germinação. Embrapa, **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, 28p. 2011.

ROSA, S. D. V. F. *et al.* Staging coffee seedling growth: A rationale for shortening the coffee seed germination test. **Seed Science and Technology**, v. 38, n. 2, p. 421–431, 2010.

SAKO, Y. *et al.* **A system for automated seed vigor assessment**. Ohio State University, p. 1–2, 1999.

- SAMBONI, H. A. T. **Análise radiográfica associada com o desempenho germinativo e determinação do vigor de sementes de café utilizando imagens digitalizadas de plântulas.** 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2018.
- SILVA, E. A. A. **Coffee (*Coffea arabica* L. cv. Rubi) seed germination: mechanism and regulation.** 105f. 2002. Thesis (Ph.D. in Crop Science) - Wageningen University, Wageningen, 2002.
- SOARES, L. P. S. *et al.* Regulador de crescimento e vácuo na germinação de sementes de café arábica. X Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, **Anais [...]** Vitória, ES, v. 2, p. 1–4, 2019.
- SOUZA, F. D. F. *et al.* Características das principais variedades de café cultivadas em Rondônia. Embrapa Rondônia. **Documentos nº 93**, 21p., 2004.
- TANIGUCHI, M. *et al.* Morpho-anatomical and biochemical characterization of *Strelitzia reginae* seeds and embryos. **Ornamental Horticulture**, v. 28, n. 3, p. 314–322, 2022.
- TRUJILLO, H. A.; GOMES JUNIOR, F. G.; CICERO, S. M. Digital images of seedling for evaluating coffee seed vigor. **Journal of Seed Science**, v. 41, n. 1, p. 60–68, 2019.
- VILELA, F. L. *et al.* Testes para avaliação do vigor de sementes de café. VI Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil. **Anais [...]** Vitória, ES, p. 1-4, 2009.
- WEERASEKARA, I. *et al.* The influence of seed production environment on seed development and quality of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). **Agronomy**, v. 11, n. 7. p. 1430-1449. 2021.
- ZAYAS, I.; CONVERSE, H.; STEELE, J. Discrimination of wholefrom broken corn kernels with image analysis. **Transactions Ofthe ASAE**, v.33, n.5, p.1642-1646, 1990.

ANEXOS

ANEXO A - Análise de variância para o percentual de acerto do equipamento GroundEye® na avaliação de plântulas de *Coffea arabica* em fase de *seta* em seis diferentes amostras construídas e duas diferentes épocas de avaliação.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Amostra Construída	5	1196,80	239,36	16,32	0,000*
Época Avaliação	1	180,27	180,27	12,29	0,000*
Amostra Const. * Época Avaliação	5	133,33	26,67	1,82	0,1271
Erro	48	704,00	14,67	-	-
Total	59	2214,40	-	-	-
CV (%)	4,06				
Média Geral	94,40				

*Significativo a 5% pelo teste de Tukey.

Fonte: Da autora (2023).

ANEXO B - Análise de variância para o percentual de plântulas de *Coffea arabica* em fase de *seta* aos 12 dias após a semeadura no teste de germinação e percentual de plântulas normais aos 30 dias após a semeadura em dez diferentes lotes de sementes e três métodos de avaliação.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Lotes	9	12560,97	1395,66	37,53	0,000*
Métodos de Avaliação	2	6099,80	3049,90	82,01	0,000*
Lotes * Métodos Avaliação	18	2045,53	113,64	3,06	0,0002*
Erro	90	3347,00	37,19	-	-
Total	119	24053,30	-	-	-
CV (%)	8,67				
Média Geral	70,35				

*Significativo a 5% pelo teste de Scott-Knott.

Fonte: Da autora (2023).