



Processamento de imagens como ferramenta importante para inteligência artificial no setor de sementes. Image processing as to important tool for artificial intelligence in the seed sector.

[Romário de Mesquita Pinheiro](#)¹, [Gizele Ingrid Gadotti](#)², [Ruan Bernardy](#)³, [Rita de Cassia Mota Monteiro](#)⁴, [Isabella Brandão Moreira](#)⁵

¹ Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas, doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, *Campus* Capão do Leão, RS. E-mail: romario.ufacpz@hotmail.com

² Centro de Engenharia - CENG, Universidade Federal de Pelotas, docente do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, Pelotas, RS. E-mail: gizeleingrid@gmail.com

³ Centro de Engenharia - CENG, Universidade Federal de Pelotas, mestrando de Pós Graduação em Ciências Ambientais, Pelotas, RS. E-mail: ruanbernady@yahoo.com.br

⁴ Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas, mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, *Campus* Capão do Leão, RS. E-mail: ritamonteiro@gmail.com

⁵ Centro de Engenharia - CENG, Universidade Federal de Pelotas, graduanda em Engenharia Agrícola, Pelotas, RS. E-mail: bellabmoreira@gmail.com

Resumo

Processamento de imagens em sementes com seu uso na análise de qualidade é uma resposta rápida para algo desafiador e laborioso. Contudo, as técnicas de aprendizado de máquinas surgem como alternativa de predição e classificação por meio de processamento de imagens, com eficiência e rapidez nos resultados de controle da qualidade nas etapas de pós-colheita de sementes. Objetivou-se relatar a inserção de processamento de imagem com inteligência artificial na área de sementes. Vários modelos de aprendizados de máquinas são propositos de investigação para melhorar as respostas de alvos trabalhosos e de elevada quantidade de dados. Estudos de aprendizados profundo na área de sementes oferece resultados promissores e tem grande potencial.

Palavras-chave: Agricultura inteligente. Aprendizado de máquinas. Inovação. Pós-colheita.

Abstract

In the quality analysis, alternatives for seed imaging are a quick response to something challenging and laborious. However, machine learning techniques emerge as an alternative for prediction and classification by image processing, with efficiency and speed of results under control of quality at the post-seed harvest stages. The objective was to report the insertion of image processing with artificial intelligence in the seed area. Various machine learning models are purposes of the investigation to improve the responses of laborious and data-intensive targets. Deep learning studies in seeds offer promising results and have great potential.

Keywords: Smart Agriculture. Machine Learning. Innovation. Post-harvest.

Introdução

A imagem multiespectral é uma nova tecnologia implantada para avaliar os parâmetros de qualidade das sementes (BOELT et al., 2018). Ferramentas inovadoras têm sido projetadas para melhorar a caracterização de diferentes classes de sementes e, conseqüentemente, as tomadas de decisões, tornando-se mais eficientes (MEDEIROS et al., 2021). As indústrias agrícolas estão buscando abordagens inovadoras para melhorar a produtividade das safras devido às mudanças climáticas imprevisíveis, ao rápido aumento do crescimento populacional e às preocupações com a segurança alimentar. Assim, a inteligência artificial na agricultura, também chamada de “Inteligência Agrícola”, está surgindo progressivamente como parte da revolução tecnológica da indústria (PATHAN et al., 2020).

Na agricultura, atualmente são gerados programas de processamento de imagem e visão computacional que vêm crescendo devido aos menores custos em equipamentos, maior poder computacional e crescente interesse em métodos de avaliação não destrutivos (MAHAJAN et al., 2015). Esse interesse também cresce para o setor de sementes, pois é o principal insumo em uma lavoura agrícola que pode gerar uma boa safra. Porém, por se tratar de técnicas avançadas, ainda é um desafio a ser superado no setor sementeiro, mas que apresenta vantagens aos métodos tradicionais de avaliação do controle de qualidade das sementes, quando se trabalha manualmente.

Métodos rápidos e não destrutivos de detecção da qualidade da semente devem, portanto, ser desenvolvidos para a agricultura e a indústria de produção de sementes (RAHMAN; CHO, 2016). A qualidade da semente é uma caracterização de múltiplos componentes, incluindo pureza varietal e analítica, capacidade de germinação, vigor, desempenho e uniformidade. Atualmente, os testes de qualidade dependem de inspeções físicas e químicas, bem como visuais, que são caras e demoradas. Além disso, as inspeções visuais são subjetivas e difíceis de reproduzir (BOELT et al., 2018).

O uso não destrutivo de sementes minimiza as perdas em testes realizados na necessidade de retirar parte de uma semente ou de uma plântula. A avaliação da qualidade das sementes é tradicionalmente realizada manualmente por trabalhadores qualificados ou semiquilificados (MAHAJAN et al., 2015). No entanto, este não é um método eficiente, pois os custos crescentes e a escassez da mão-de-obra prejudicam a eficiência do processo de avaliação (KANNUR et al., 2011). Avaliações visuais da qualidade da semente usando cor, tamanho, forma e textura são fáceis de realizar, mas podem ser altamente subjetivas, tediosas, caras e inconsistentes, se feitas manualmente (BROSNAN; SUN, 2004, DU; SUN, 2004, DU; SUN, 2006, GUNASEKARAN, 1996). Por outro lado, a avaliação da qualidade da semente com base na visão de máquina pode ser alcançada em menos tempo de teste e com maior eficiência devido à sua velocidade e consistência. Benefícios adicionais incluem melhor precisão e disponibilidade 24 horas, o que leva a menores custos de avaliação (BROSNAN, SUN, 2002; JAYAS et al., 2000).

Nesse sentido, o uso da visão de máquina tem crescido nos últimos anos, com o intuito de atender à crescente demanda por métodos rápidos e precisos no monitoramento da produção agrícola (PATRÍCIO, RIEDER, 2018). O aprendizado de máquina é um subconjunto da inteligência artificial, onde os avanços são rápidos e significativos (KAKKAD et al., 2019). Problemas muito complexos para serem resolvidos por humanos são enfrentados por aprendizado de máquina, deslocando a carga da tomada de decisão para o algoritmo (SHAH et al., 2020a; SHAH et al., 2020b; PATEL et al., 2020a, PATEL et al., 2020b; PANCHIWALA, SHAH, 2020; TALAVIYA et al., 2020). Com isso o objetivo deste trabalho foi relatar a inserção de processamento de imagem com inteligência artificial na área de sementes.

Metodologia

Usou-se uma metodologia dedutiva, de caráter exploratório, fundamentada em pesquisa bibliográfica. Este trabalho revisa pesquisas anteriores e atuais sobre o uso e a aplicação de inteligência artificial na agricultura, acompanhado de seus efeitos no setor sementeiro com a utilização de processamento de imagens. Neste contexto, foi feita uma abordagem com maior enfoque na influência da inteligência artificial com o uso de processamento de imagens aplicado ao setor de sementes. E também foram destacados alguns trabalhos que retratam o início das pesquisas utilizando o processamento de imagens em culturas agrícolas, com ênfase em sementes.

As palavras-chave utilizadas na coleta de literatura para essa revisão foram “aprendizado de máquinas em sementes”, “processamento de imagens”, “inteligência artificial em sementes”, “técnica não destrutiva”, “técnicas de processamento de imagens por inteligência artificial”, “tipos de imagens”. Bancos de dados computacional, ferramentas de imagens na inteligência artificial (todos os bancos de dados, CAB Abstracts e Global Health, Medline, Pubmed, Web of Science, BIOSIS Citation Index, Science Direct, Current Content Connect, Google Scholar, Scielo, Frontiers e Springer Link) foram pesquisados entre agosto e novembro de 2021.

Especificamente, processamento de imagens em sementes, com aprendizado de máquinas como ferramenta para inteligência artificial em processo de pós-colheita, relataram trabalhos empregados nos últimos 25 anos (1996–2021). As técnicas e tipos de imagens, com seus domínios de pesquisa para solucionar os mais variados problemas encontrados, foram considerados prioritários. Artigos com abrangência sobre métodos de uso de imagens e aprendizado de máquinas aplicado a inteligência artificial no setor sementeiro também tiveram prioridade. O estado em que os experimentos foram realizados, o tipo de ensaio utilizado, a modelagem testada e a forma de aplicação da técnica computacional que apresentava eficiência, foram utilizados para filtrar a pesquisa

O Science Direct foi filtrado usando (inteligência artificial na agricultura com enfoque imagens) e (aprendizado de máquinas em sementes) - em vista dos retornos de títulos >30 – utilizando filtros diferentes a outras bases de dados conforme necessário. Todos os documentos considerados estavam em inglês e foram traduzidos para o português.

Referencial teórico

A literatura apresenta uma abordagem do uso de inteligência artificial aplicado no setor de sementes via processamento de imagens, com aprendizado de máquinas em vários segmentos da área sementeira. Embora se tenha mais de 20 anos de estudos sobre imagens aplicadas à qualidade de sementes, o fato é que o uso da inteligência artificial necessita ser estudada em várias etapas da pós-colheita de sementes, pois, é algo novo para os sementeiros. Nesse trabalho, apresentamos pesquisas atuais que foram desenvolvidas na linha de investigação com imagens para avaliar qualidade de sementes.

A forma como se interpreta os dados para aprendizado profundo de máquinas nesse setor de sementes ainda necessita de alguns esclarecimentos e metodologias mais acessíveis, para que possa ser transferida a tecnologia aos produtores rurais de sementes como uma ferramenta promissora. Nessa revisão, apontamos alguns estudos realizado com a inteligência artificial e o processamento de imagens através de técnicas de aprendizado de máquinas.

Inteligência artificial na automação do setor de sementes

Na modernização e automação da agricultura, existe a necessidade de uma tecnologia que seja mais facilmente compreendida, implementada e utilizada pelos agricultores. O objetivo é que possa demonstrar eficiência nos resultados de pós-colheita neste setor sementeiro, pois uma demanda de dados nas avaliações de qualidade de sementes é algo que requer cuidado e se torna muito trabalhoso. Atualmente, a demanda por equipamentos agrícolas que requerem menor esforço humano e tempo está aumentando a cada dia. Além disso, devido ao desenvolvimento da Internet das coisas e da robótica, os equipamentos agrícolas também se tornaram mais inteligentes (KUMAR, ASHOK, 2021). A facilidade de uso da tecnologia associada a inteligência artificial permite respostas rápidas, fornecendo resultados confiáveis com boa acessibilidade, atraindo profissionais e leigos.

A automação agrícola é a principal preocupação e assunto emergente para todos os países (JHA et al., 2019). O uso de inteligência artificial envolve o processo de aprendizagem das máquinas em todos os ramos das ciências de investigações experimentais (PINHEIRO et al., 2021a), sendo que na agricultura está sendo cada vez mais comum. Para o setor de Ciência e Tecnologia de sementes é algo promissor, porém, na área sementeira, ainda pode demandar um período prolongado para as investigações e soluções tecnológicas através de inteligência artificial nas linhas de pesquisas de armazenamento, secagem, beneficiamento, controle de qualidade e fisiologia da qualidade de sementes, entre outros. De acordo com Pinheiro et al. (2021b), interpretar os resultados gerados pela técnica de aprendizado de máquinas é um passo essencial para garantir uma informação robusta e precisa na tomada de decisão. Tudo isso irá fornecer subsídio aos produtores e empresas de sementes com modelos precisos para prever a produtividade das culturas e a qualidade das sementes.

Nos países em desenvolvimento e/ou subdesenvolvidos, a operação de análise da qualidade de sementes (pós-colheita) atualmente é realizada manualmente. Em algumas situações do processo ocorre por meio automatizado (semeadura, colheita, beneficiamento e secagem). Entretanto, a natureza de algumas tarefas é monótona e o envolvimento de uma quantidade considerável de mão-de-obra torna-se imprecisa, tediosa e cara. Assim, algoritmos de aprendizagem de máquina estão sendo testados de modo a estabelecer uma melhor alternativa na predição dos resultados das análises de sementes sobre sua qualidade fisiológica. Treinar robôs pode ser uma alternativa para modernizar todo o processo nesse setor, incluindo a combinação de análise de imagens e dados digitais e/ou manuais, no qual trabalhadores humanos podem ser substituídos por autômatos na análise e coleta de dados, reduzindo os custos operacionais, tornando o processo mais rápido e eficaz.

A medida que ferramentas inovadoras de tecnologia da informação e comunicação foram gradualmente introduzidas ao longo das últimas décadas no setor agrícola, o uso de sistemas de informação de gestão agrícola foi amplamente expandido e hoje são considerados ferramentas importantes para a gestão do negócio agrícola (PARAFOROS et al., 2017). Estes mesmos autores relatam que, a carga de trabalho necessária para coletar, agregar e importar dados relacionados às atividades agrícolas em um sistema de informação de gestão agrícola é uma tarefa que geralmente consome tempo e os agricultores relutam em realizar. Desse mesmo modo acontece nos processos de pós-colheita das sementes, pois existe uma infinidade de dados que são gerados afim de garantir a qualidade destas. A combinação de informações adequadas relacionadas ao tempo com tomada de decisão cuidadosa é o fator chave para o sucesso no negócio de sementes.

Análise de imagens na avaliação da qualidade fisiológica de sementes

Toda a natureza do processo de pós-colheita de sementes envolve os aspectos da germinação. Se beneficiar, secar e armazenar esse material, ou qualquer outra etapa que envolve a propagação de uma espécie via sexuada, necessita realizar testes de vigor e germinação para garantir uma alta produtividade e resistência a condições adversas do ambiente. O uso de técnicas não destrutivas na avaliação da qualidade de sementes permite reutilizá-las, sendo muito importante para espécies florestais, no qual, algumas produzem poucas sementes e/ou a coleta se torna difícil, trabalhando com uma quantidade de amostras reduzidas. Para as espécies agrícolas, as informações obtidas por meio de imagem permitem maior rapidez na interpretação dos dados, visto que o volume de dados é grande.

A viabilidade de investigar a taxa de germinação em sementes individuais dentro de uma população sugere que as técnicas de análise de imagens têm alto potencial em estudos de biologia de sementes (DELL'AQUILA et al., 2000). Considerando que o uso da análise de imagens na tecnologia da Ciência de Sementes tem levado a avanços consideráveis na avaliação da qualidade das mesmas (MEDEIROS et al., 2020a). Alguns estudos sugere que as técnicas de inteligência artificial e de imagem possam agilizar o trabalho com a grande quantidade de dados gerados na avaliação da qualidade de sementes entre as etapas de pós-colheita. Neste contexto, usando técnicas de visão de máquina baseadas em imagens não destrutivas permite obter estimativa e classificação de características de sementes com alta precisão.

Dependendo das características do alvo, vários métodos de análise de imagem foram desenvolvidos, como imagem de raios-X (MOONEY et al., 2012), imagem por ressonância magnética (van DUSSCHOTEN et al., 2016), imagem bidimensional (2D) (PORNARO et al., 2017) e imagens tridimensionais (3D) (TOPP et al., 2013; van DUSSCHOTEN et al., 2016). Além disso, imagens hiperespectrais e multiespectrais, imagens de raios X suaves, microtomografia computadorizada, termografia infravermelha (MEDEIROS et al., 2021) também foram acrescentadas nas pesquisas. Entre as tecnologias ópticas disponíveis, a imagem de raio-X suave tem sido aplicada com sucesso para a inspeção de sementes com mais frequência (HUANG et al., 2015; KOTWALIWALE et al., 2014). A principal vantagem desta técnica é a capacidade de obter informações de forma não destrutiva sobre a morfologia interna da semente (MEDEIROS et al., 2021).

Sendo uma técnica não destrutiva para avaliar aspectos de integridade morfológica e fisiológica das sementes, no qual se observa as suas características externas e internas, os métodos de avaliação através de imagens têm ganhado destaque na área da Ciência e Tecnologia de sementes. Os métodos tradicionais usados na determinação dos parâmetros essenciais de qualidade das sementes são habitualmente realizados usando técnicas destrutivas baseadas em métodos bioquímicos e moleculares realizados por analistas de sementes (ELMasry et al., 2020). Mesmo sendo preciso e eficiente, esses métodos em laboratório apresentam limitações, principalmente com a demora de obter resultados rápidos e eficientes sobre a qualidade física e fisiológica de sementes. Assim, órgãos oficiais de sementes perceberam a importância de desenvolver novas tecnologias avançadas para superar as limitações dos métodos tradicionais de determinação da qualidade de sementes (BOELT et al., 2018).

A necessidade dos setores da indústria de sementes em desenvolverem novos métodos que permitam uma avaliação mais rápida da qualidade e composição destas tem sido alvo de pesquisa sobre os métodos rápidos e não destrutivos, especialmente técnicas ópticas, espectrais e de imagem (ELMasry et al., 2020). A imagem biológica de amostras inalteradas pode ser realizada em tempo real de atributos físicos, químicos, fisiológicos e sanitários, revelando a qualidade interna de vários produtos agrícolas e alimentícios, incluindo grãos, frutas, vegetais, carne e peixes (WU, SUN, 2013; RAHMAN, CHO, 2016; KUMAR, KARNE, 2017), como também das sementes. Métodos baseados

em propriedades eletromagnéticas de tecidos de sementes, como fluorescência de clorofila e imagem multiespectral, se encaixam bem nessas características desejáveis (GALLETTI et al., 2020).

As técnicas de análise de imagens tornaram-se mais confiáveis com o desenvolvimento de microscópios de fluorescência e alta resolução para ganhar o interesse dos pesquisadores. A possibilidade de estudar os detalhes estruturais de elementos biológicos, como organismos e suas partes internas e externas, pode ter um impacto profundo na pesquisa biológica (LODDO et al., 2021) e agrárias, assumindo papel importante nas subáreas agrônômicas (Fitotecnia). Em geral, é uma importante área de pesquisa no domínio agrícola para classificação de imagens, detecção de anomalias, cores, tamanhos e formas (KAMILARIS, PRENAFETA-BOLDÚ, 2018).

Os aspectos físicos das sementes através de suas características morfológicas estão entre as observações mais difundidas pelo processamento de imagens. A forma e o tamanho das sementes estão entre as características agrônômicas mais vitais, uma vez que desempenham um papel crucial na qualidade da alimentação, na produção e no preço de mercado (LIU et al., 2020). A avaliação quantitativa de suas características morfológicas externas e internas pode promover o progresso das áreas de pesquisa de plantas, incluindo genética, fisiologia, análise funcional e melhoramento de plantas (TANABATA et al., 2021). Nesse caso, métodos para obtenção de imagens do interior das sementes tem a capacidade de obter informações de forma não destrutiva sobre a sua morfologia interna. Além disso, pesquisas recentes demonstraram que parâmetros físicos internos avaliados por imagens de raios-X de sementes têm forte relação com a germinação e o vigor (ABUD et al., 2018; DELL'AQUILA, 2007; GAGLIARDI, MARCOS-FILHO, 2011; MEDEIROS et al., 2020a, 2020b).

Para avaliações físicas das sementes quanto aos seus aspectos morfológicos não é necessário realizar nenhum procedimento de ruptura dos tegumentos das sementes. Portanto, ao analisar uma amostra de uma espécie desconhecida é necessário analisar internamente as estruturas prévias com cortes horizontais ou transversais, com intuito de conhecer a morfologia interna e identificar as estruturas que a compõe a semente. E deste modo, obtendo-se os conhecimentos prévios, pode-se realizar ou aplicar métodos de análise de imagem profunda (Figura 1).

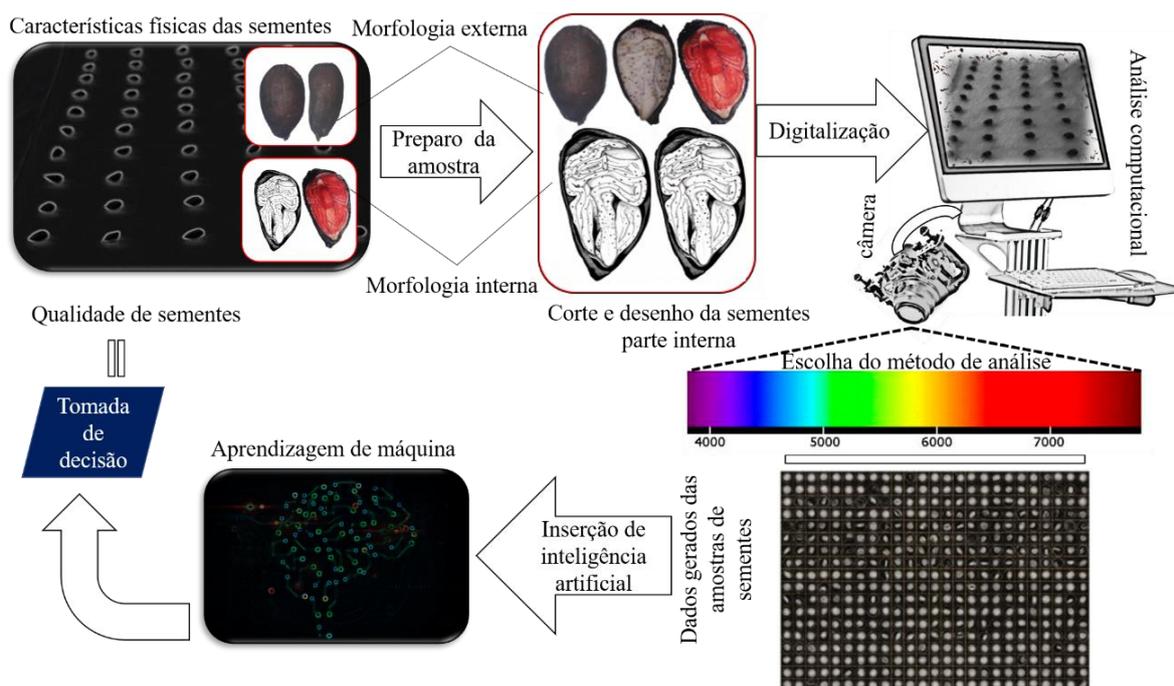


Figura 1 - Esquema para preparação de amostra para sementes de espécies não conhecidas e utilização do processamento de imagens como ferramentas para inteligência artificial.

Os dados gerados através das imagens podem ser utilizados no treinamento de aprendizagem de máquina. Portanto, conhecimento das estruturas internas antes de qualquer análise é necessário para garantir que a avaliação está sendo correta e de acordo com a resposta fisiológica da espécie e seus aspectos estruturais.

Aspectos atuais de investigação sobre os estudos em sementes no processamento de imagem e inteligência artificial

Visão de máquina ou análise de imagem é uma ferramenta importante no estudo da morfologia de quaisquer materiais (SUMATHI, BALAMURUGAN, 2013). As novas técnicas baseadas em inteligência artificial pode tornar possível a automatização da análise quantitativa e qualitativa no setor de sementes agrícolas, forrageiras, florestais e hortícolas. Muitos testes e/ou análises padrão para garantir a qualidade e o bom desenvolvimento de uma cultura são exigidas pela lei brasileira, além de profissionais credenciados pelo MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento) que realize os trabalhos manuais. A imagem óptica é uma tecnologia rápida, não destrutiva e precisa, que pode produzir medições consistentes da qualidade do produto em comparação com as técnicas convencionais (GALLETTI et al., 2020).

Desde modo, vários pesquisadores tem investigados os métodos de aplicação dessas tecnologias mencionadas nos setores sementeiros. A partir do ano de 2000, os resultados analisados através de imagens já demonstravam ser promissores. Esses profissionais, então, buscaram esclarecer seus benefícios na avaliação de sementes em diferentes culturas. Com destaque para os trabalhos de Dell'Aquila et al. (2000), que investigaram a aplicação da análise de imagens no monitoramento do processo de embebição de sementes de couve-branca (*Brassica oleracea* L.), e Ducournau et al. (2004), sobre o sistema de aquisição de imagens para monitoramento automatizado da taxa de germinação de sementes de girassol. Novamente, Dell'Aquila, (2005) utilizou análise de imagens para monitorar a germinação de sementes de brócolis (*Brassica oleracea*) e rabanete (*Raphanus sativus*). Dell'Aquila, (2007) observou a germinação de sementes de pimenta avaliada por radiografia combinada e análise de imagem auxiliada por computador.

Teixeira et al. (2007) estudaram a montagem instrumental para processo germinativo com controle de temperatura e registro automático de imagens. Dell'Aquila (2009) apresentou uma revisão sobre tecnologia da informação de imagem digital aplicada ao teste de germinação de sementes. Geetha et al. (2011) avaliaram a caracterização de genótipos de mostarda por meio de análise de imagens. Sivakumar et al. (2013) realizaram a discriminação de sementes de acácia em níveis de espécies e subespécies usando um analisador de imagem. Škrubej et al. (2015) investigaram a avaliação da taxa de germinação de tomate usando processamento de imagem e aprendizado de máquina. Oliveira et al. (2021) demonstraram parâmetros morfológicos de processamento de imagens para caracterizar a emergência de raízes primárias na avaliação do vigor de sementes de tomate.

As abordagens baseadas em imagens, que usam tecnologias de processamento digital de imagens e visão computacional, oferecem soluções para medir automaticamente uma variedade de recursos de tamanho e forma a partir de alta resolução em um modo de alto rendimento (LIU et al., 2020). Graças à sua ampla gama de aplicações, a análise de imagens desempenha um papel importante no campo das Ciências Agrárias, sendo primordial nos processos de pós-colheita de sementes, onde envolve secagem, beneficiamento, armazenamento e além do controle de qualidade. Estas etapas demandam uma série de informações que requer cuidados e rapidez na entrega de resultados, além

de gerar um alto volume de dados. Sendo assim, exige de um analista a máxima atenção ao interpretar os valores, a fim de garantir a entrega de sementes com alta qualidade ao produtor.

Neste contexto, o aprendizado de máquinas e o processamento de imagens surgem para agregar segurança e agilidade de todo o processo sementeiro. Loddo et al. (2021) asseguram que as técnicas de análise de imagens se tornaram mais confiáveis com o desenvolvimento de microscópios de fluorescência e alta resolução para ganhar o interesse de todos os setores. O aprendizado profundo é uma técnica recente e moderna para processamento de imagens e análise de dados na área de sementes. Porém requer algumas investigações em várias análises que são realizadas nas etapas de pós-colheita de sementes.

Os avanços tecnológicos vêm possibilitando o aprimoramento do uso de aprendizados de máquinas e o processamento de imagens, onde recentemente a tecnologia de imagem hiperespectral tem sido uma questão de grande interesse em uma ampla gama de campos, como sensoriamento remoto e ciência médica, qualidade e segurança alimentar, detecção de doenças de plantas, qualidade de sementes e assim por diante (ELISABETH et al., 2019; FENG et al., 2020; XING et al., 2019; ZHANG et al., 2016).

Consideraremos duas abordagens para a identificação de morfologia, dimensões e até variedades de sementes. O primeiro é a detecção de amostras a granel e o segundo é a identificação de semente única. Para a avaliação destas sementes com base a granel, os espectros médios de cada são frequentemente extraídos de acordo com a região predefinida de interesse. No caso de uma única semente, a imagem hiperespectral pode adquirir simultaneamente imagens hiperespectrais de centenas ou milhares de sementes individuais. O espectro de cada uma pode ser extraído, o que o torna bastante adequado para classificação de variedades e para garantir a pureza das mesmas (FENG et al., 2019).

Em sementes de arroz, Brunet et al. (2019) determinaram o comprimento de parte aérea, como também a área foliar de plântulas de arroz através de processamento de imagens com ótimas condições de técnicas convencionais na avaliação do vigor de sementes de arroz. Em estudos com soja, Monteiro et al. (2021), avaliaram a identificação dos danos nas sementes e concluíram que é possível segregar sementes esverdeadas com uma tecnologia barata como RGB. E ainda para a separação de sementes enrugadas sob dano por umidade foi possível segregar com acerto de 74,3% as sementes com médio a alto grau de danos por umidade.

Considerações finais

Vários modelos de aprendizados de máquinas são propósitos de investigação para melhorar as respostas de alvos trabalhosos e problemáticos. Estudos de aprendizados profundo na área de sementes oferecem resultados promissores e com grande potencial.

No setor sementeiro, novas metodologias podem ser apresentadas para prever vários parâmetros fisiológicos de modo a garantir a qualidade de sementes, bem como determinar lotes de alta qualidade através de inteligência artificial. Com isso, ferramentas que utilizam lógica fuzzy, redes neurais, árvores de decisão, naïve bayes, agrupamento de k-means, máquinas de vetor de suporte, floresta aleatória, entre outras, contribuem para as aplicações do aprendizado profundo na área sementeira.

O processamento de dados, com uma visão de máquina através de imagens no campo da Ciência e Tecnologia de sementes, permite selecionar e classificar dados dimensionais elevados,

facilitando a extração e seleção de recursos com algoritmos de previsão apropriado. Para tanto, considera investigar todas as etapas de pós-colheita de sementes focando em inteligência artificial.

Conflitos de interesse

Não houve conflito de interesses dos autores.

Contribuição dos autores

Romário de Mesquita Pinheiro - ideia original, leitura e interpretação das obras e escrita; Gizele Ingrid Gadotti - orientação, correções e revisão do texto; Ruan Bernardy - revisão de texto; Rita de Cassia Mota Monteiro e Isabella Brandão Moreira - correções textuais.

Referências bibliográficas

- ABUD, H. F.; CICERO, S. M.; GOMES-JUNIOR, F. G. Radiographic images and relationship of the internal morphology and physiological potential of broccoli seeds. **Acta Scientiarum-Agronomy**, v. 40, e34950, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.34950>
- BALTUSSEN, E. J. M.; KOK, E. N. D.; KONING, S. G. B.; SANDERS, J.; AALBERS, A. G. J.; KOK, N. F. M.; BEETS, G. L.; FLOHIL, C. C.; BRUIN, S. C.; KUHLMANN, K. F. D.; STERENBORG, H. J. C. M.; RUERS, T. J. M. Hyperspectral imaging for tissue classification, a way toward smart laparoscopic colorectal surgery. **Journal of Biomedical Optics**, v. 24, n. 1, p. 1-9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.24.1.016002>
- BOELT, B.; SHRESTHA, S.; SALIMI, Z.; JØRGENSEN, J.; NICOLAISEN, M.; CARSTENSEN, J. Multispectral imaging - a new tool in seed quality assessment? **Seed Science Research**, v. 28, n. 3, p. 222-228, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0960258518000235>
- BROSNAN, T.; SUN, D-W. Improving quality inspection of food products by computer vision - a review. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 1, p. 3-16, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00183-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00183-3)
- BROSNAN, T.; SUN, D-W. Inspection and grading of agricultural and food products by computer vision systems - a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 36, n. 2-3, p. 193-213, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00101-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00101-1)
- BRUNES, A. P.; ARAÚJO, Á. S.; DIAS, L. W.; ANTONIOLLI, J.; GADOTTI, G. I.; VILLELA, F. A. Rice seeds vigor through image processing of seedlings. **Ciência Rural**, v. 49, n. 8, p. 1-6, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180107>
- DELL'AQUILA, A. Digital imaging information technology applied to seed germination testing. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 29, n. 1, p. 213-221, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1051/agro:2008039>
- DELL'AQUILA, A. Pepper seed germination assessed by combined X-radiography and computer-aided imaging analysis. **Biologia Plantarum**, v. 51, n. 4, p. 777-781, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10535-007-0159-9>
- DELL'AQUILA, A. The use of image analysis to monitor the germination of seeds of broccoli (*Brassica oleracea*) and radish (*Raphanus sativus*). **Annals of Applied Biology**, v. 146, n. 4, p. 545-550, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2005.040153.x>

- DELL'AQUILA, A.; VAN ECK, J.; VAN DER HEIJDEN, G. The application of image analysis in monitoring the imbibition process of white cabbage (*Brassica oleracea* L.) seeds. **Seed Science Research**, v. 10, n. 2, p. 163-169, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0960258500000179>
- DU, C-J.; SUN, D-W. Learning techniques used in computer vision for food quality evaluation: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 72, n. 1, p. 39-55, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.11.017>
- DU, C-J.; SUN, D-W. Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. **Trends in Food Science & Technology**, v. 15, n. 5, p. 230-249, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.10.006>
- DUCOURNAU, S.; FEUTRY, A.; PLAINCHAULT, P.; REVOLLON, P.; VIGOUROUX, B.; WAGNER, M. H. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.04.005>
- ELMASRY, G.; ELGAMAL, R.; MANDOUR, N.; GOU, P.; AL-REJAIE, S.; BELIN, E.; ROUSSEAU, D. Emerging thermal imaging techniques for seed quality evaluation: principles and application. **Food Research International**, v. 131, 109025, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109025>
- FENG, L.; ZHU, S.; LIU, F.; HE, Y.; BAO, Y.; ZHANG, C. Hyperspectral imaging for seed quality and safety inspection: a review. **Plant Methods**, v. 15, n. 91, p. 1-25, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0476-y>
- FENG, X.; ZHAN, Y.; WANG, Q.; YANG, X.; YU, C.; WANG, H.; TANG, Z.; JIANG, D.; PENG, C.; HE, Y. Hyperspectral imaging combined with machine learning as a tool to obtain high-throughput plant salt-stress phenotyping. **The Plant Journal**, v. 101, n. 6, p. 1448-1461, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.14597>
- GAGLIARDI, B.; MARCOS-FILHO, J. Relationship between germination and bell pepper seed structure assessed by the X-ray test. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 4, p. 411-416, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162011000400004>
- GALLETTI, P. A.; CARVALHO, M. E. A.; HIRAI, W. Y.; BRANCAGLIONI, V. A.; ARTHUR, V.; SILVA, C. B. Integrating optical imaging tools for rapid and non-invasive characterization of seed quality: Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and Carrot (*Daucus carota* L.) as study cases. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 577851, p. 1-17, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.577851>
- GEETHA, V.; BALAMURUGA, V. P.; BHASKARAN, M. Characterization of mustard genotypes through image analysis. **Research Journal of Seed Science**, v. 4, n. 4, p. 192-198, 2011. DOI: <https://doi.org/10.3923/rjss.2011.192.198>
- GUNASEKARAN, S. Computer vision technology for food quality assurance. **Trends in Food Science & Technology**, v. 7, n. 8, p. 245-256, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-2244\(96\)10028-5](https://doi.org/10.1016/0924-2244(96)10028-5)
- HUANG, M.; WANG, Q. G.; ZHU, Q. B.; QIN, J. W.; HUANG, G. Review of seed quality and safety tests using optical sensing technologies. **Seed Science and Technology**, v. 43, n. 3, p. 337-366, 2015. DOI: <https://doi.org/10.15258/sst.2015.43.3.16>
- JAYAS, D. S.; PALIWAL, J.; VISEN, N. S. Review paper (AE-Automation and emerging technologies): Multi-layer neural networks for image analysis of agricultural products. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 77, n. 2, p. 119-128, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0559>
- JHA, K.; DOSHI, A.; PATEL, P.; SHAH, M. A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 2, p. 1-12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.05.004>

- KAKKAD, V.; PATEL, M.; SHAH, M. Biometric authentication and image encryption for image security in cloud framework. **Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design**, v. 2, n. 4, p. 233-248, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41939-019-00049-y>
- KAMILARIS, A.; PRENAFETA-BOLDÚ, F. X. Deep learning in agriculture: a survey. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 147, p. 70-90, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
- KANNUR, A.; KANNUR, A.; RAJPUROHIT, V. S. Classification and grading of bulk seeds using artificial neural network. **International Journal of Machine Intelligence**, v. 3, n. 2, p. 62-73, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.9735/0975-2927.3.2.62-73>
- KOTWALIWALE, N.; SINGH, K.; KALNE, A.; JHA, S. N.; SETH, N.; KAR, A. X-ray imaging methods for internal quality evaluation of agricultural produce. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 1, p. 1-15, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0485-y>
- KUMAR, P.; ASHOK, G. Design and fabrication of smart seed sowing robot. **Materials Today: Proceedings**, v. 39, part 1, p. 354-358, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.432>
- KUMAR, Y.; KARNE, S. C. Spectral analysis: a rapid tool for species detection in meat products. **Trends in Food Science & Technology**, v. 62, p. 59-67, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.02.008>
- LIU, W.; LIU, C.; JIN, J.; LI, D.; FU, Y.; YUAN, W. High-throughput phenotyping of morphological seed and fruit characteristics using x-ray computed tomography. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 601475, p. 1-10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.601475>
- LODDO, A.; LODDO, M.; DI RUBERTO, C. A novel deep learning based approach for seed image classification and retrieval. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 187, 106269, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106269>
- MAHAJAN, S.; DAS, A.; SARDANA, H. K. Image acquisition techniques for assessment of legume quality, **Trends in Food Science & Technology**, v. 42, n. 2, p. 116-133, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.01.001>
- MEDEIROS, A. D.; BERNARDES, R. C.; SILVA, L. J.; FREITAS, B. A. L.; DIAS, D. C. F. S.; SILVA, C. B. Deep learning-based approach using X-ray images for classifying *Crambe abyssinica* seed quality, **Industrial Crops and Products**, v. 164, 113378, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113378>
- MEDEIROS, A. D.; PINHEIRO, D. T.; XAVIER, W. A.; SILVA, L. J.; DIAS, D. C. F. S. Quality classification of *Jatropha curcas* seeds using radiographic images and machine learning. **Industrial Crops and Products**, v. 146, 112162, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112162>
- MEDEIROS, A. D.; SILVA, L. J.; SILVA, J. M.; DIAS, D. C. F. S.; PEREIRA, M. D. IJCropSeed: An open-access tool for high-throughput analysis of crop seed radiographs. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 175, 105555, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105555>
- MONTEIRO, R. C. M.; GADOTTI, G. I.; MALDANER, V.; CURI, A. B. J.; BARBARA NETO, M. Image processing to identify damage to soybean seeds. **Ciência Rural**, v. 51, n. 2, p. 1-8, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200107>
- MOONEY, S. J.; PRIDMORE, T. P.; HELLIWELL, J.; BENNETT, M. J. Developing X-ray computed tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil. **Plant and Soil**, v. 352, n. 1-2, p. 1-22, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1039-9>
- OLIVEIRA, G. R. F. de; SALLES, F. K. L. de; BATISTA, T. B.; SILVA, M. S. da; CÍCERO, S. M.; GOMES-JUNIOR, F. G. Morphological parameters of image processing to characterize primary root emergence in evaluation of tomato seed vigor. **Journal of Seed Science**, v. 43, e202143005, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v43245215>

- PANCHIWALA, S.; SHAH, M. A Comprehensive study on critical security issues and challenges of the IoT world. **Journal of Data, Information and Management**, v. 2, n. 4, p. 257-278, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42488-020-00030-2>
- PARAFOROS, D. S.; VASSILIADIS, V.; KORTENBRUCK, D.; STAMKOPOULOS, K.; ZIOGAS, V.; SAPOUNAS, A. A.; GRIEPENTROG, H. W. Multi-level automation of farm management information systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 142, part B, p. 504-514, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.022>
- PATEL, D.; SHAH, Y.; THAKKAR, N.; SHAH, K.; SHAH, M. Implementation of artificial intelligence techniques for cancer detection. **Augmented Human Research**, v. 5, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41133-019-0024-3>
- PATEL, H.; PRAJAPATI, D.; MAHIDA, D.; SHAH, M. Transforming petroleum downstream sector through big data: a holistic review. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology**, v. 10, n. 6, p. 2601-2611, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00889-2>
- PATHAN, M.; PATEL, N.; YAGNIK, H.; SHAH, M. Artificial cognition for applications in smart agriculture: a comprehensive review. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 4, p. 81-95, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.06.001>
- PATRÍCIO, D. I.; RIEDER, R. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: a systematic review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 153, p. 69-81, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.001>
- PINHEIRO, R. de M.; GADOTTI, G. I.; MONTEIRO, R. de C. M.; BERNARDY, R. Inteligência artificial na agricultura com aplicabilidade no setor sementeiro. **Diversitas Journal**, v. 6, n. 3, p. 2996-3012, 2021a. DOI: https://doi.org/10.48017/Diversitas_Journal-v6i3-1857
- PINHEIRO, R. M.; GADOTTI, G. I.; BERNARDY, R.; ASCOLI, C. A. Análise do desempenho de técnicas de aprendizado de máquina para classificação de lotes de sementes de soja. *In: 7 SIEPE - Semana Integrada UFPEL 2021 - XXII Encontro de Pós-Graduação, Anais... ENPÓS, 2021b, Pelotas. XXIII ENPÓS, 2021.* https://cti.ufpel.edu.br/siepe/arquivos/2021/CA_04087.pdf
- RAHMAN, A.; CHO, B-W. Assessment of seed quality using non-destructive measurement techniques: a review. **Seed Science Research**, v. 26, n. 4, p. 285-305, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0960258516000234>
- SHAH, M.; VAIDYA, D.; SIRCAR, A. Using Monte Carlo simulation to estimate geo-thermal resource in Dholera geothermal field, Gujarat, India. **Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design**, v. 1, n. 2, p. 83-95, 2018a. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41939-018-0008-x>
- SHAH, M.; SIRCAR, A.; SHAIKH, N.; PATEL, K.; THAKAR, V.; SHARMA, D.; SARKAR, P.; VAIDYA, D. Groundwater analysis of dholera geothermal field, Gujarat, India for suitable application. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 7, p. 143-156, 2018b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.05.002>
- SIVAKUMAR, V.; ANANDALAKSHMI, R.; WARRIER, R. R.; SINGH, B. G.; TIGABU, M.; NAGARAJAN, B. Discrimination of *Acacia* seeds at species and subspecies levels using an image analyzer. **Forest Science and Practice**, v. 15, n. 4, p. 253-260, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11632-013-0414-4>
- ŠKRUBEJ, U.; ROZMAN, Č.; STAJNKO, D. Assessment of germination rate of the tomato seeds using image processing and machine learning. **European Journal of Horticultural Science**, v. 80, n. 2, p. 68-75, 2015. DOI: <https://doi.org/10.17660/eJHS.2015/80.2.4>

- SUMATHI, S.; BALAMURUGA, P. Characterization of oats (*Avena sativa* L.) cultivars using machine vision. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 16, n. 20, p. 1179-1183, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3923/pjbs.2013.1179.1183>
- TALAVIYA, T.; SHAH, D.; PATEL, N.; YAGNIK, H.; SHAH, M. Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 4, p. 58-73, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.04.002>
- TANABATA, T.; SHIBAYA, T.; HORI, K.; EBANA, K.; YANO, M. Smartgrain: high-throughput phenotyping software for measuring seed shape through image analysis. **Plant Physiology**, v. 160, n. 4, p. 1871-1880, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.112.205120>
- TEIXEIRA, P. C. N.; COELHO NETO, J. A.; ROCHA, H.; OLIVEIRA, J. M. An instrumental set up for seed germination studies with temperature control and automatic image recording. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 2, p. 99-108, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000200002>
- TOPP, C. N.; IYER-PASCUZZI, A. S.; ANDERSON, J. T.; LEE, C. R.; ZUREK, P. R.; SYMONOVA, O.; ZHENG, Y.; BUCKSCH, A.; MILEYKO, Y.; GALKOVSKIY, T.; MOORE, B. T.; HARER, J.; EDELSBRUNNER, H.; MITCHELL-OLDS, T.; WEITZ, J. S.; BENFEY, P. N. 3D phenotyping and quantitative trait locus mapping identify core regions of the rice genome controlling root architecture. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 18, p. E1695-E1704, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1304354110>
- van DUSSCHOTEN, D.; METZNER, R.; KOCHS, J.; POSTMA, J. A.; PFLUGFELDER, D.; BÜHLER, J.; SHURR, U.; JAHNKE, S. Quantitative 3D analysis of plant roots growing in soil using magnetic resonance imaging. **Plant Physiology**, v. 170, n. 3, p. 1176-1188, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.15.01388>
- WU, D.; SUN, D-W. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: a review - Part II: Applications. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 19, p. 15-28, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.04.016>
- XING, F.; YAO, H.; LIU, Y.; DAI, X.; BROWN, R. L.; BHATNAGAR, D. Recent developments and applications of hyperspectral imaging for rapid detection of mycotoxins and mycotoxigenic fungi in food products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 59, n. 1, p. 173-180, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1363709>
- ZHANG, C.; GUO, C.; LIU, F.; KONG, W.; HE, Y.; LOU, B. Hyperspectral imaging analysis for ripeness evaluation of strawberry with support vector machine. **Journal of Food Engineering**, v. 179, p. 11-18, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.002>

Recebido em 8 de janeiro de 2022

Retornado para ajustes em 8 de março de 2022

Recebido com ajustes em 9 de março de 2022

Aceito em 27 de março de 2022