



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE GURUPI  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

**DAYARA VIEIRA SILVA**

**USO DE IMAGENS DE BAIXO CUSTO EM PROGRAMAS DE MELHORAMENTO  
VISANDO SELEÇÃO E RECOMENDAÇÃO DE LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI  
COM ELEVADO POTENCIAL PRODUTIVO**

Gurupi, TO

2024

**Dayara Vieira Silva**

**Uso de imagens de baixo custo em programas de melhoramento visando seleção e  
recomendação de linhagens de feijão-caupi com elevado potencial produtivo**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em  
Produção Vegetal da Universidade Federal do Tocantins  
(UFT), como requisito à obtenção do grau de Doutor em  
Produção Vegetal.

Orientador: Dr. Rodrigo Ribeiro Fidelis  
Coorientador: Dr. Jose Luis Araus Ortega

Gurupi, TO  
2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

V658u Veira Silva, Dayara.  
Uso de imagens de baixo custo em programas de melhoramento visando seleção e recomendação de linhagens de feijão-caupi com elevado potencial produtivo. / Dayara Veira Silva. – Gurupi, TO, 2024.  
77 f.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Gurupi - Curso de Pós-Graduação (Doutorado) em Produção Vegetal, 2024.

Orientador: Rodrigo Ribeiro Fidelis

Coorientador: José Luis Araus Ortega

1. Sensoriamento remoto. 2. Melhoramento genético. 3. Agricultura 4.0. 4. Fenotipagem. I. Título

**CDD 635**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

DAYARA VIEIRA SILVA

USO DE IMAGENS DE BAIXO CUSTO EM PROGRAMAS DE MELHORAMENTO  
VISANDO SELEÇÃO E RECOMENDAÇÃO DE LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI COM  
ELEVADO POTENCIAL PRODUTIVO

Tese apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Gurupi, Curso de Doutorado em Produção Vegetal foi avaliado para a obtenção do título de Doutora e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de Aprovação \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Rodrigo Ribeiro Fidelis  
Orientador  
Universidade Federal do Tocantins

---

Prof. Dr. Jose Luis Araus Ortega  
Coorientador  
Universidade de Barcelona

---

Prof. Dr. Vitor de Laia Nascimento  
Examinador  
Universidade Federal de Lavras

---

Prof. Dr. Jacinto Pereira Santos  
Examinador  
Universidade Federal do Tocantins

---

Prof. Dr. Marcos Giongo  
Examinador  
Universidade Federal do Tocantins

Dedico este trabalho a Deus, cuja essência é o amor mais puro, e à minha família, a quem amo incondicionalmente.

## AGRADECIMENTOS

Antes de mais nada, gostaria de expressar minha eterna gratidão a Deus; tudo que sou devo ao amor que encontrei em você.

Agradeço de maneira especial aos meus pais, Maria do Carmo Vieira Reis e Fernandes Rosa Silva, a quem amo profundamente. Mesmo nos momentos de dificuldade, não mediram esforços para que eu pudesse chegar até aqui, e às minhas irmãs Adelayde, Heyde Valéria, Keytte Fernanda e Suelem, por estarem ao meu lado e por serem fonte constante de amor, alegria e motivação. Em especial à Keytte, por sua ajuda generosa e incansável.

Com muito carinho, agradeço ao meu melhor amigo e grande amor, José Antonio, cujo apoio contínuo, afeto e incentivo foram fundamentais. Agradeço também à sua família, que me acolheu com carinho e generosidade, tornando essa jornada ainda mais especial.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Rodrigo Fidelis, pelos ensinamentos, amizade, apoio e incentivo. Sua confiança em me conceder liberdade para explorar novas ideias e desenvolver meu próprio senso crítico e investigativo foi fundamental para minha formação como pesquisadora.

Sou grata aos membros da comissão de defesa, especialmente ao Professor José Luis Araus, por ter me recebido em seu grupo de pesquisa durante o intercâmbio, mesmo sem me conhecer previamente. A oportunidade de participar de sua equipe ampliou meus horizontes acadêmicos e proporcionou aprendizado inestimável, fundamental para a realização deste trabalho.

Não posso deixar de agradecer e reconhecer a contribuição dos meus colegas e amigos Karoline Borges, Juliana Ferrari, Natália Martins, Igor Teixeira, Keici Borges, Erika Borges, Danilo Veloso, Patrícia Sumara, Simone Teles, Paulo Cavazzini, Luciano Santos e Wádilla Moraes, por cada conversa e risada que tornaram essa jornada mais leve e especial. Agradeço aos colegas do grupo de pesquisa “Melhoramento Genético de Grandes Culturas e Espécies com Potencial Bioenergético”, pela colaboração na implantação e avaliações deste trabalho. Suas contribuições foram essenciais para alcançar um resultado sólido e bem fundamentado.

Agradeço à Universidade Federal do Tocantins, aos colaboradores e especialmente à secretária do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Erika Menezes, cuja eficiência e disponibilidade foram essenciais nesta jornada. Minha gratidão também à CAPES pelo financiamento, primordial para a realização desta pesquisa.

Por fim, reitero minha profunda gratidão a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Sem o apoio, incentivo e colaboração de cada um de vocês, esta conquista não teria sido possível. Muito obrigada!

## RESUMO

O desenvolvimento de novas cultivares de feijão-caupi através do melhoramento genético auxilia na redução da necessidade de expandir novas áreas agrícolas, algo impulsionado pelo crescimento populacional e mudanças na dieta. A análise de imagens na seleção de novos genótipos é uma alternativa de baixo custo que ajuda à maximização da produtividade, contribuindo para uma agricultura mais eficiente e sustentável visando a promoção da segurança alimentar em regiões menos desenvolvidas. Esta pesquisa foi realizada no estado do Tocantins, região Norte do Brasil, e estudou vários parâmetros utilizando imagens RGB para avaliar o desempenho produtivo do feijão-caupi, identificar a melhor fase para ponderar a produtividade e selecionar linhagens em um programa de melhoramento genético. No capítulo I, foi realizado um experimento em vasos com três cultivares de feijão-caupi (BRS Guariba, BRS Nova Era e Pingo de Ouro). As análises de imagens foram confrontadas com técnicas de fenotipagem tradicional e medidor eletrônico de clorofila. Onde utilizou-se Tukey a 5% para comparar médias, e análises de correlação das variáveis. A cultivar Pingo de Ouro teve maior produtividade de grãos por vaso. As análises de imagens mostraram resultados compatíveis com índices de produtividade, sendo que os elementos de análise de imagens que melhor se correlacionaram com o rendimento foram Hue, GA e GGA. Os capítulos II e III foram conduzidos durante os anos agrícolas de 2022 e 2023, onde foram analisadas 9 linhagens e uma testemunha comercial de feijão-caupi em 4 repetições, utilizando um drone com câmera RGB. No segundo capítulo, as imagens foram capturadas em 5 estádios de desenvolvimento (V3, V7, R5, R7 e R9), e analisadas com o software Breedpix 2.0 para os parâmetros Hue, GA e GGA. Além disso, foram avaliados altura da planta, peso de mil sementes e produtividade. A análise de variância realizada pelo teste F e o teste de Tukey a 5% mostraram diferença estatística em vários parâmetros. A fase R5 foi a mais adequada para avaliar o rendimento do feijão-caupi por meio de imagens RGB, proporcionando uma análise mais precisa. No terceiro capítulo, foi realizado um único voo na fase R5 para capturas das imagens RGB. Também foram analisados teor de nitrogênio das folhas, altura das plantas, diâmetro do caule, número e tamanho das vagens, número de grãos por vagem, peso de mil sementes e produtividade. A análise estatística indicou diferenças para altura de plantas, número de vagens por planta, peso de mil sementes, saturação e parâmetros  $v^*$  e  $b^*$  analisados através de imagens. Os parâmetros Hue e GGA foram fortemente associados à produtividade, destacando as linhagens FC 602, FC 2006, FC 1103 e FC 2309 como as mais promissoras para cultivo no estado do Tocantins.

**Palavras-chave:** *Vigna unguiculata*. sensoriamento remoto. melhoramento genético. agricultura 5.0.

## ABSTRACT

The development of new cowpea cultivars through genetic improvement helps reduce the need to expand new agricultural areas, something driven by population growth and changes in diet. Image analysis in the selection of new genotypes is a low-cost alternative that helps maximize productivity, contributing to more efficient and sustainable agriculture aimed at promoting food security in less developed regions. This research was carried out in the state of Tocantins, northern Brazil, and studied several parameters using RGB images to evaluate the productive performance of cowpea, identify the best phase to weigh productivity and select lines in a genetic improvement program. In chapter I, an experiment was carried out in pots with three cowpea cultivars (BRS Guariba, BRS Nova Era and Pingo de Ouro). The image analyses were compared with traditional phenotyping techniques and an electronic chlorophyll meter. Where Tukey at 5% was used to compare means and analyze correlation of variables. The cultivar Pingo de Ouro had the highest grain productivity per pot. The image analyses showed results compatible with productivity indices, and the image analysis elements that best correlated with yield were Hue, GA, and GGA. Chapters II and III were conducted during the 2022 and 2023 agricultural years, where 9 cowpea lines and a commercial control were analyzed in 4 replicates, using a drone with an RGB camera. In the second chapter, the images were captured at 5 development stages (V3, V7, R5, R7, and R9), and analyzed with the Breedpix 2.0 software for the Hue, GA, and GGA parameters. In addition, plant height, thousand-seed weight, and productivity were evaluated. The analysis of variance performed by the F test and the Tukey test at 5% showed statistical difference in several parameters. The R5 phase was the most suitable for evaluating cowpea yield through RGB images, providing a more accurate analysis. In the third chapter, a single flight was carried out at the R5 phase to capture the RGB images. Nitrogen content of leaves, plant height, stem diameter, number and size of pods, number of grains per pod, weight of a thousand seeds and productivity were also analyzed. Statistical analysis indicated differences in plant height, number of pods per plant, weight of a thousand seeds, saturation and  $v^*$  and  $b^*$  parameters analyzed through images. The Hue and GGA parameters were strongly associated with productivity, highlighting the lines FC 602, FC 2006, FC 1103 and FC 2309 as the most promising for cultivation in the state of Tocantins.

**Keywords:** *Vigna unguiculata*. remote sensing. genetic improvement. agriculture 5.0.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>10</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>12</b>
	<b>CAPÍTULO I</b> Avaliação de cultivares de feijão-caupi no estado do Tocantins através de análises de imagens.....	<b>13</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>28</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>29</b>
	<b>CAPÍTULO II:</b> Épocas de avaliação do rendimento de feijão-caupi através de imagens de baixo custo.....	<b>32</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>33</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>
	<b>CAPÍTULO III:</b> Seleção de linhagens de feijão-caupi no sul estado do tocantins através de análise de imagens RGB.....	<b>54</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>55</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>58</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>63</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>72</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A expansão das áreas utilizadas para a produção agrícola se potencializou nos últimos anos, isso se deve principalmente ao intenso crescimento populacional e mudanças na dieta. Segundo o Departamento de Censo dos EUA, em 2022 a população mundial atingiu a marca de 8 bilhões de pessoas (WORLDMETER, 2024). Neste cenário, ao mesmo tempo em que prevalece a preocupação pela garantia da segurança alimentar, outros pontos têm sido fortemente questionados pelos consumidores, que estão cada vez mais exigentes por uma produção sustentável e produtos ambientalmente seguros.

O aumento de produtividade agrícola através do melhoramento genético reduz a demanda por novas áreas de plantio (FREIRE FILHO e RIBEIRO, 2023). Porém, o desenvolvimento de novas cultivares é um processo demorado, devido a necessidade de teste de variedades em períodos de cultivo, afim de selecionar genótipos superiores para a produção.

No decorrer da história, o melhoramento genético de plantas sempre acompanhou a evolução de avanços tecnológicos e científicos, passando por diversas fases. A primeira fase teve início com as primeiras interações entre humanos e plantas, que de forma simples separavam as plantas úteis das invasoras, e se estendeu até os anos 10.000 a.C e 8.000 a.C, marcada pela seleção intencional de plantas com características desejáveis. Em seguida, o Melhoramento Genético 2.0, marcado pela genética mendeliana e biometria, permitindo a previsão dos resultados da seleção. O Melhoramento Genético 3.0 ocorreu paralelamente a Revolução Industrial 3.0 e assim como a Revolução, foi marcada pela incorporação de novas técnicas, que permitiram a identificação de marcadores moleculares e análise de dados genômicos de alto rendimento. O Melhoramento Genético 4.0 ainda se encontra em expansão, esta fase é impulsionada pela convergência de tecnologias avançadas que combinam Sistemas de Informações Geográficas (SIG), drones, sensoriamento remoto, dados multiômicos, inteligência artificial, à genotipagem de larga escala. Este tipo de tecnologia evolui muito rápido, e nos direciona para uma atual fase de transição para o Melhoramento Genético 5.0 (RESENDE et al., 2023).

O Melhoramento Genético 5.0. é caracterizado pela aplicação de tecnologias que conferem alto grau de precisão e prometem revolução na forma como se desenvolvem os cultivares, atuando na descarboxilação do sistema agroalimentar. Segundo Atefi et al. (2021), a automação de processos e o avanço da robótica juntamente com imagens de detecção, são considerados promissores para a fenotipagem de plantas de alto rendimento no futuro, devido a velocidade, precisão, abrangência e custo-benefício nas medições de traços das plantas.

O uso de imagens obtidas através de drones na agricultura, permite a captura de dados precisos e em alta resolução de grandes áreas, e com o emprego de softwares adequados no tratamento de imagens, é possível extrair informações fenotípicas associadas a dados morfológicos, fisiológicos e produtivos de diversas espécies durante as diferentes fases do ciclo da cultura, permitindo a otimização de tempo do processo de seleção.

A fenotipagem através de análises de imagens em feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), tem sido uma alternativa promissora para a maximização de produtividade através do melhoramento genético. Esta espécie é de grande relevância mundial para a segurança alimentar principalmente em regiões menos favorecidas, como o continente africano, onde por quase 6.000 anos o feijão-caupi tem sido amplamente utilizado como fonte de proteína primária com menor preço (ABEBE, B. K. e ALEMAYEHU, 2022). No Brasil, o feijão-caupi é um dos principais componentes da dieta alimentar nas regiões Norte e Nordeste, especialmente na zona rural devido ao seu alto valor nutritivo e baixo custo de produção (de OLIVEIRA, 2021).

Embora seja uma cultura de fácil adaptação às diferentes condições edafoclimáticas, as produtividades dessa cultura são relativamente baixas. A produtividade média mundial em 2022 foi de cerca de 643,5 kg.ha<sup>-1</sup>, enquanto no Brasil a média de produtividade para este mesmo período foi de 458 kg.ha<sup>-1</sup>.

Segundo Digrado et al. (2020), otimizar as culturas a partir das características do dossel é uma excelente estratégia para aumentar o rendimento e atender às necessidades da população em crescimento até 2050. A área fotossintética do dossel, ou seja, as características de desenvolvimento foliar (número de folhas, área foliar e índice de área foliar) apresenta correlação positiva com a produtividade de feijão-caupi (AYALEW et al., 2022).

Dessa forma, é possível que a abordagem da área fotossintética por meio de análises de imagens e o emprego de softwares, seja uma forma de conectar os avanços do melhoramento genético à redução de demanda por novas áreas de plantio para a produção de feijão-caupi. Além disso, a maximização de produtividade representa um aumento de disponibilidade do alimento, bem como a redução de preços pelos princípios de oferta e demanda, auxiliando a garantia e promoção da segurança alimentar.

## REFERÊNCIAS

- ABEBE, B. K.; ALEMAYEHU, M. T. A review of the nutritional use of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) for human and animal diets. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 10, 100383. 2022.
- ATEFI, A.; GE, Y.; PITLA, S.; SCHNABLE, J. Robotic technologies for high-throughput plant phenotyping: contemporary reviews and future perspectives. **Frontiers in Plant Science**, v. 12. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.611940>
- AYALEW, T.; YOSEPH, T.; HÖGY, P.; CADISCH, G. Leaf growth, gas exchange and assimilation performance of cowpea varieties in response to *Bradyrhizobium* inoculation. **Heliyon**, v. 8, n. 1, e08746. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08746>.
- de OLIVEIRA, A. M. C.; MELO NETO, B.; ROCHA, M. D. M.; da SILVA, M. R.; de OLIVEIRA, M. R. Produção de alimentos na base do feijão-caupi (*Vigna unguiculata*): importância nutricional e benefícios para a saúde. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, e56101416054. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i14.16054>.
- DIGRADO, A.; MITCHELL, N. G.; MONTES, C. M.; DIRVANSKYTE, P.; AINSWORTH, E. A. Assessing diversity in canopy architecture, photosynthesis, and water-use efficiency in a cowpea magic population. **Food and Energy Security**, v. 9, n. 4, e236. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/fes3.236>. Acesso em: 22 ago. 2024.
- FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q. **Feijão-Caupi na Embrapa Meio-Norte: melhoramento, cultivares lançadas, genealogias e base genética**. Embrapa. 1039 p. Brasília, DF. 2023. ISBN 978-65-5467-000-5.
- RESENDE, R. T.; BRONDANI, C.; CHAVES, L. O melhoramento na era de agricultura de precisão. In: FREIRE FILHO, F. R. (org.). **Feijão-Caupi na Embrapa Meio-Norte: melhoramento, cultivares lançadas, genealogias e base genética**. Embrapa. Cap. 1, p. 13-39. Brasília, DF. 2023.
- WORLDOMETER. **População Mundial Atual: Ao Vivo: 8.110.904.130+ Contando** (a partir de 21 de maio de 2024 às 12:28h, Horário de Brasília, Brasil). Disponível em: <https://www.worldometers.info>. Acesso em 21 de maio de 2024.

## CAPÍTULO I

### AVALIAÇÃO DE CULTIVARES DE FEIJÃO-CAUPI NO ESTADO DO TOCANTINS ATRAVÉS DE ANÁLISES DE IMAGENS

#### RESUMO

O feijão-caupi é um alimento altamente associado a segurança alimentar, por ser uma fonte barata de proteína. No Brasil, os municípios do Norte e Nordeste são responsáveis por mais de 86% da produção nacional, embora não consigam as maiores produtividades por área. Os avanços em produtividade se devem principalmente pela evolução do melhoramento genético associado ao manejo, e para isso, é necessário o emprego de tecnologias cada vez mais avançadas nas etapas de seleção de genótipos potencialmente produtivos. Dessa forma, o objetivo deste estudo é avaliar a viabilidade do uso de imagens RGB como ferramenta de avaliação do desempenho produtivo do feijão-caupi. O ensaio foi conduzido em vasos com 7 repetições, comparando três cultivares de feijão-caupi (BRS Guariba, BRS Nova Era e Pingo de Ouro) no Estado do Tocantins. As análises de imagens foram comparadas com resultados de técnicas de fenotipagem tradicional e medidor eletrônico de clorofila. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%, e as variáveis submetidas a análises multivariadas e de correlação. Houve diferença significativa de produtividade, onde a cultivar Pingo de Ouro apresentou maior produtividade de grãos por vaso. As análises de imagens apresentaram resultados compatíveis com os índices de produtividade, demonstrando potencial de serem empregadas em programas de melhoramento genético de feijão-caupi para seleção de genótipos com potencial de alto desempenho produtivo.

**Palavras-chave:** *Vigna unguiculata*. fenotipagem. sensoriamento terrestre. clorofila.

#### ABSTRACT

Cowpea is a food highly associated with food security, as it is a cheap source of protein. In Brazil, the municipalities of the North and Northeast are responsible for more than 86% of the national production, although they do not achieve the highest productivity per area. The advances in productivity are mainly due to the evolution of genetic improvement associated with management, and for this, it is necessary to use increasingly advanced technologies in the stages of selection of potentially productive genotypes. Thus, the objective of this study is to evaluate the feasibility of using RGB images as a tool to evaluate the productive performance of cowpea. The trial was conducted in pots with 7 replicates, comparing three cowpea cultivars (BRS Guariba, BRS Nova Era and Pingo de Ouro) in the State of Tocantins. The image analyses were compared with results from traditional phenotyping techniques and electronic chlorophyll meter. The means were compared by Tukey's test at 5%, and the variables were subjected to multivariate and correlation analyses. There was a significant difference in productivity, with the Pingo de Ouro cultivar showing higher grain yield per pot. The image analyses showed results compatible with the productivity indexes, demonstrating potential for use in cowpea genetic improvement programs for selecting genotypes with potential for high productive performance.

**Keywords:** *Vigna unguiculata*. phenotyping. terrestrial sensing. chlorophyll.

## 1 INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) é uma leguminosa de grande valor econômico e nutricional, considerada importante fonte barata de proteína para a população nos países em desenvolvimento (CARVALHO et al., 2023). De origem africana, esta espécie foi introduzida no Brasil na segunda metade do século XVI pelos colonizadores portugueses.

Entre 2013 e 2023, a área plantada com feijão-caupi no Brasil cresceu 25,8%, passando de 961.513 para 1.209.900 hectares. A produtividade aumentou 14,5%, de 400 para 458 kg/ha, enquanto a produção total subiu 44,3%, de 384.367 para 554.600 toneladas. O aumento significativo da área plantada, indica que a expansão das áreas de cultivo foi o principal fator para o aumento na produção, superando o crescimento da produtividade. Este cenário destaca a necessidade de desenvolver e implementar alternativas que aumentem a produtividade sem a necessidade de expandir a área plantada na mesma proporção, assegurando um crescimento sustentável e eficiente da produção de feijão-caupi (EMBRAPA, 2024; CONAB, 2023).

Segundo Santos et al. (2014), caso fossem mantidos os níveis de produtividades obtidos de vinte anos atrás no Brasil, seria necessário incorporar mais de 66 milhões de hectares para produzir uma safra equivalente a de hoje. Os avanços em produtividade se devem principalmente pela evolução do melhoramento genético associado ao manejo adequado.

A baixa produtividade de culturas agrícolas é um problema que afeta o agronegócio e a segurança alimentar, e um dos principais meios para mitigar esta situação é o desenvolvimento de cultivares que maximizem o uso de recursos naturais de forma sustentável e sejam tolerantes aos principais estresses, por meio do melhoramento genético (PRADO, 2023).

A identificação de plantas com potencial produtivo em um programa de melhoramento é muito minuciosa. Altamente demandadoras de tempo, as técnicas de fenotipagem tradicionais avaliam características facilmente mensuráveis, analisando planta por planta com medidas em sua maioria relacionadas a tamanhos e pesos, apresentando como vantagens a possibilidade das medições serem realizadas em qualquer horário e sem a necessidade de equipamentos sofisticados, por outro lado, além de alguns métodos serem destrutíveis, essas técnicas dependem muito do “olho do melhorista”, dando margem para erros (SOUSA, 2014).

Este cenário induz a comunidade científica, cada vez mais a desenvolver novas técnicas de avaliação, para que a seleção de cultivares seja feita de maneira mais rápida e eficiente. Uma das primeiras criações de ferramentas não destrutivas e analíticas foi o medidor de clorofila, baseado na absorvância de radiação pelas folhas nas regiões vermelha do infravermelho próximo (geralmente entre 650 e 940 nm) (BUCHAILLOT et al., 2019).

Nos últimos anos, para a avaliação desses aspectos, a fenotipagem tem avançado em relação às técnicas tradicionais, principalmente pelo uso de imagens. Normalmente a captura de imagens são rápidas, não invasivas, precisas, livres de resíduos e permitem explorar áreas relativamente grandes (SOUSA, 2014). Essas novas ferramentas demonstram em grande parte suas várias aplicações na agricultura, incluindo previsão de rendimento. Dessa forma é possível identificar em um programa de melhoramento, quais são as linhagens potencialmente mais produtivas antes da colheita. A comercialização de imagens de satélite tem sido bastante aplicada para este fim, porém suas resoluções espaciais ainda são muito grosseiras, além da dificuldade de captação de imagens com presença de nuvens (QUEIROZ et al., 2022).

O uso de informações derivadas de imagens RGB (usando faixas de cores vermelhas, verdes e azuis – do inglês *Red*, *Green* e *Blue* –) adquiridas com câmeras digitais convencionais representa uma alternativa de baixo custo (GRACIA-ROMERO et al., 2018). As câmeras de imagens RGB conseguem fazer capturas nos comprimentos de ondas entre 400 e 700nm, sendo essa a faixa de radiação que interage de forma direta com a atividade fotossintética das plantas. Por meio da técnica de fotointerpretação, essas imagens fornecem informações através dos índices de vegetação (CAVALCANTE et al., 2022).

Espaços de cores são frequentemente utilizados para análises de imagens nos mais diversos setores. Na agricultura, operações realizadas através da associação entre a coloração das folhas e espaços de cores, fornecem parâmetros que podem ser usados como indicadores de características da vegetação. Usando softwares adequados é possível processar imagens RGB, convertendo as cores presentes nas imagens em índices relacionados a vegetação do dossel das plantas e associa-las a produtividade (CASADESÚS et al., 2007; GRACIA-ROMERO et al., 2018).

A cor verde, associada aos teores de clorofila e ao atraso na senescência foliar, são correlacionados ao rendimento das culturas (PRADO, 2023), dessa forma, o objetivo deste estudo é avaliar a viabilidade do uso de imagens RGB como uma ferramenta alternativa para a avaliação do desempenho produtivo em programas de melhoramento genético de feijão-caupi. O desempenho da metodologia proposta é comparado com resultados de técnicas de fenotipagem tradicional e medidor eletrônico de clorofila.

## 2 METODOLOGIA

O experimento foi conduzido em ambiente desprotegido, na estação experimental da Universidade Federal do Tocantins, Câmpus de Gurupi (11°44'52.5"S e 49°02'57.5"W), entre os meses de julho a outubro de 2022. O clima local, segundo a classificação de Köppen-Geiger, é do tipo Aw (clima tropical com estação seca) (DUBREUIL et al., 2018).

O ensaio foi desenvolvido utilizando Latossolo Vermelho – Amarelo distrófico conforme classificação da Embrapa (EMBRAPA, 2013), coletado na área experimental da UFT – Câmpus de Gurupi, em condições de vegetação nativa, corrigido e adubado de acordo com a análise do solo (Tabela 1), ajustando para as necessidades da cultura (SOUSA e LOBATO, 2004). Trinta dias antes da semeadura, o solo foi preparado com a mistura de 3,46 t.ha<sup>-1</sup> de calcário, 16 kg.ha<sup>-1</sup> de fósforo (P) na forma de fosfato (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e 58 kg.ha<sup>-1</sup> de potássio (K) na forma de óxido de potássio (K<sub>2</sub>O), utilizando uma betoneira. Essa mistura foi então distribuída em sacos de polietileno de 10 dm<sup>3</sup>. Posteriormente, 30 dias após a semeadura, realizou-se a adubação de cobertura com 30 kg.ha<sup>-1</sup> de nitrogênio (N) na forma de ureia e 29 kg.ha<sup>-1</sup> de potássio (K) na forma de óxido de potássio K<sub>2</sub>O.

Tabela 1 – Valores químicos e físicos da análise do solo, onde CTC<sub>t</sub> é a Capacidade de Troca de Cátions Total; M.O indica o teor de matéria orgânica; m (%) é a saturação por Alumínio e V (%) indica a saturação por base.

pH	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	ppm	%	g.kg <sup>-1</sup>								
CTC <sub>t</sub>	Cálcio (Ca)	Magnésio (Mg)	Alumínio (Al)	Potássio (K)	Fósforo (P)	m	V	M.O	Areia	Silte	Argila	
5,4	2,72	0,7	0,2	0,00	9	0,7	0	34	1,2	435	75	500

pH (em CaCl<sub>2</sub>); Extratores: P, K (Mehlich 1); Ca, Mg e Al (KCl 1M). Fonte: Autor

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), com 3 cultivares de feijão-caupi amplamente cultivadas nas regiões Norte e Nordeste do Brasil (BRS Guariba, BRS Nova Era e Pingo de Ouro) e 7 repetições.

No tratamento de sementes foram utilizados fungicida a base de tiofanato metílico + fluazinam na dose de 160 ml por 100 kg de sementes e inseticida Fipronil + fungicida Piraclostrobina e Tiofanato Metílico na dose de 200 ml por 100 kg de sementes, conforme recomendações das bulas.

Foram semeadas sete sementes de feijão-caupi por vaso, efetuando-se o desbaste no estádio V4, afim de obter duas plantas por vaso. Semanalmente foi realizada a aplicação de inseticida caseiro (vinagre + sabão + água) para controle de pulgão (OLIVEIRA, 2022;

OLIVEIRA, 2021) e diariamente foram realizadas regas, até atingir a capacidade do vaso, sempre ao final da tarde, com suspensão na fase de maturação plena.

As avaliações com técnicas de fenotipagem tradicional foram realizadas no início do florescimento com avaliações de altura de planta (cm) – utilizando-se uma régua para medir a distância entre a gema apical até a base do solo de cada planta; diâmetro de planta (mm) – determinado fazendo uso de paquímetro digital com leitura realizada a 2 cm acima da superfície do solo. Na fase de maturação fisiológica avaliou-se quantidade de vagens por planta – obtido pela contagem do número total de vagens por planta de cada vaso; tamanho de vagem (cm) – medindo a distância do comprimento total da vagem com uso de régua; número de grãos por vagem – obtido por meio do número total de grãos oriundos da planta, dividindo o resultado pelo número total de vagens; e produtividade por vaso (g) – avaliada em balança de precisão de 0,01 g por meio da pesagem dos grãos de cada vaso, com correção para 13% de umidade.

A metodologia tradicional para determinação de índice total de clorofila utilizada foi descrita por Lichtenthaler (1987), trata-se de um método destrutivo que se baseia na avaliação do terceiro trifólio do ápice para a base de cada planta. As folhas foram levadas para o laboratório de Fitotecnia, onde foram retirados 0,25g de massa fresca da parte central foliar utilizando tesoura e balança analítica de precisão. Na ausência direta de luz, o material vegetal foi macerado em almofariz e transferido para tubos de ensaio de vidro no qual foi adicionado 2 mL de acetona com concentração 80% a cada tubo. Os tubos foram acondicionados em caixas de isopor e armazenados em refrigerador sob a temperatura de 16°C por um período de 48h, sendo que diariamente os tubos eram agitados. Passado o período de 48h, foi adicionado mais 8mL de acetona com concentração de 80% a cada tubo, que em seguida foram centrifugados por 10 minutos em uma velocidade de 3000 rpm. Uma alíquota do sobrenadante de cada amostra foi transferida para cubetas de vidro realizando-se a leitura de cada amostra em espectrofotômetro nas absorvâncias 663, 646 e 470. A partir dessas leituras determinou-se a concentração ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) de clorofilas totais por meio de fórmulas propostas por Arnon (1949).

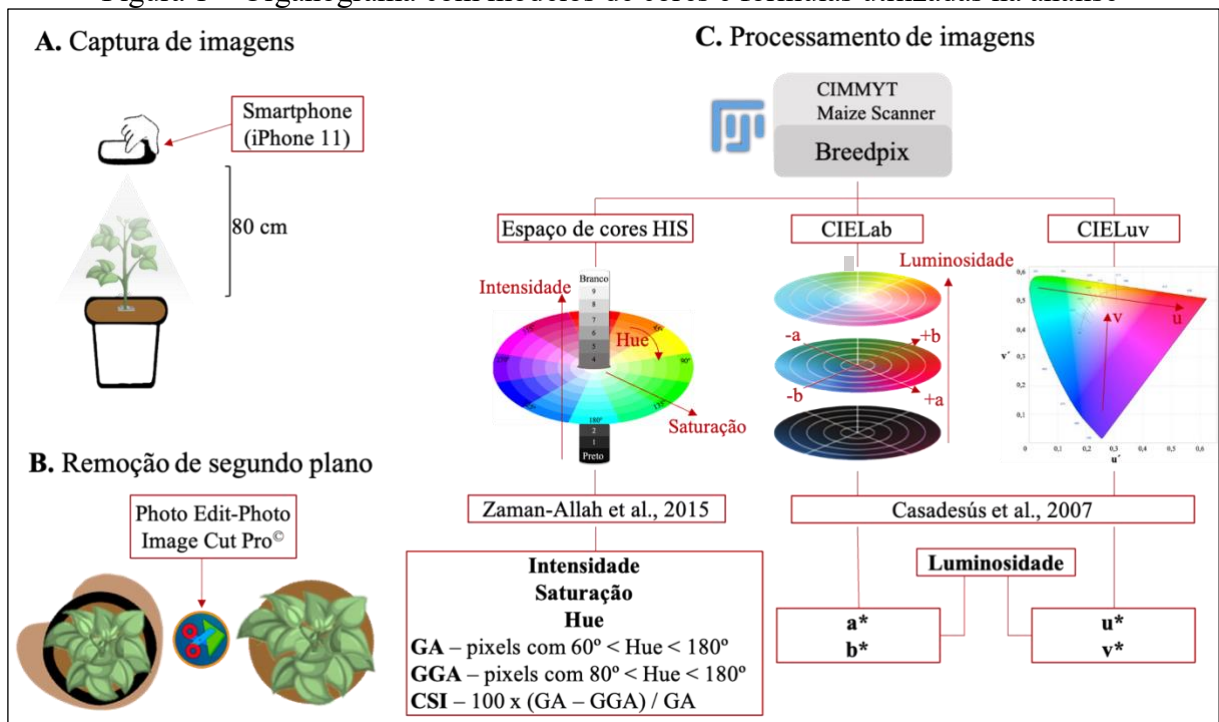
O teor de clorofila total também foi medido utilizando um clorofilômetro modelo CFL1030 (ClorofiLOG, Falker Automação Agrícola, Brasil), obtidos no terceiro trifólio do ápice para a base de cada planta.

As imagens RGB também foram extraídas no início do florescimento. As imagens foram capturadas por vaso, ao meio-dia a fim de evitar o sombreamento de uma planta sobre a outra, posicionando a câmera a uma distância de 80 cm da parte superior de cada vaso, formando um ângulo de 90° entre a superfície do solo e a câmera (Figura 1-A). A câmera digital convencional utilizada foi de um aparelho celular smartphone do modelo iPhone 11 que possui duas lentes

com sensores de 12 megapixels (MP), sendo a lente utilizada a grande-angular com estabilização óptica, abertura de f/1.8 e distância focal de 4,25 mm. As imagens foram salvas no formato JPEG com resolução de 3024 x 4032 pixels. Em seguida, foram tratadas com o software Photo Edit-Photo Image Cut Pro<sup>®</sup> versão 3.1.5 (ZHANG, 2023) para remoção de elementos de segundo plano, permanecendo apenas o vaso com suas respectivas plantas na imagem (Figura 1-B).

As imagens foram analisadas utilizando o software Breedpix 2.0 (CASADESÚS e VILLEGAS, 2015), adaptada ao Java8, integradas com o plug-in CIMMYT Maize Scanner (EL-HADDAD e KEFAUVER, 2023) disponível no pacote de processamento de imagens Fiji-2 (SCHINDELIN et al., 2012). A análise é realizada baseada nos modelos de cores HIS, Cie-Luv e Cie-Lab que são constantemente utilizados para aplicações de processamento de imagens (Figura 1-C).

Figura 1 – Organograma com modelos de cores e fórmulas utilizadas na análise



Fonte: Autor

Este software permite a extração de informações que indicam características da vegetação a partir das cores dos pixels presentes na imagem, expressando-os em diversas unidades (GRACIA-ROMERO et al., 2018). A análise foi realizada selecionando a pasta com todas as imagens dos vasos e em seguida o software gerou um documento com dados dispostos em tabela com valores estabelecidos de Hue, saturação, intensidade, GA, GGA, CSI,

luminosidade,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $u^*$  e  $v^*$  de cada amostra. Cada componente de cor e a sua proporção dentro do dossel das plantas foram associados a dados indicadores de produtividade.

No espaço de cores HIS (Hue, Intensidade e Saturação), o componente Hue descreve o próprio valor da cor, atravessando o espectro visível na forma de um ângulo entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$  (pixels verdes estão presentes entre os ângulos  $60^\circ$  e  $180^\circ$ ), a intensidade representa clareza, sendo 0 a cor totalmente escura (preto) e 10 clareza absoluta (branco), e saturação indica a porcentagem da cor que aparece na mistura que vai desde 0% (cinza, sem cor) a 100% (cor completa). O GA mede a área verde, ou seja, os pixels na imagem na faixa de  $60^\circ$  a  $180^\circ$ , que vão desde amarelo a verde azulado, enquanto o GGA mede a área mais verde ( $80^\circ$  a  $180^\circ$ ) desprezando os pixels com tons verdes-amarelados. Além disso, o GA e GGA são utilizados para calcular o índice de senescência de colheita (CSI) que é calculado aplicando a seguinte fórmula:

$$\text{CSI} = (\text{GA} - \text{GGA}) \cdot \text{GA}^{-1} \cdot 100 \quad (1)$$

Também foram utilizados os modelos de espaço de cores CIELab e CIELuv, onde o L representa a luminosidade, sendo 0% totalmente escuro (preto) e 100% clareza absoluta (branco). No CIELab, O componente  $a^*$  representa a faixa de verde a vermelho, onde valores positivos estão relacionados a cor vermelha e valores negativos a cor verde, enquanto o componente  $b^*$  varia entre azul e amarelo, com valores positivos relacionados a cor amarela e valores negativos ao azul. Da mesma forma, no espaço de cor CIELuv as coordenadas  $u^*$  e  $v^*$  são sensivelmente uniformes, onde o componente  $v^*$  começa com a cor azul na parte inferior do espaço em direção ao amarelo na parte superior central, e o valor de  $u^*$  move-se do verde no canto superior esquerdo em direção ao vermelho no canto superior direito (POINTER, 2009).

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância pelo teste F e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que a variável  $u^*$  foi submetida a transformação de  $\sqrt{y+1}$ , utilizando o programa estatístico SISVAR® versão 5.7. Para avaliar a relação entre as variáveis e construção de gráficos foram realizadas correlação de Pearson e métodos multivariados, onde foram aplicadas técnicas de agrupamento para análise de componente principais (PCA) utilizando o software R e RStudio.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta o resumo da análise de variância para as características de avaliação realizadas com técnicas de fenotipagem tradicional, medidor eletrônico de clorofila e com o uso de imagens RGB.

Tabela 2 – Análise de variância e comparação de médias de cultivares de feijão-caupi avaliadas por meio de técnicas tradicionais, medidor eletrônico de clorofila e análise de imagens.

FV	GL	QM	Guariba	Nova Era	Pingo de Ouro	CV (%)
Produtividade por vaso	18	78,24*	1,41 c	3,66 b	7,99 a	36,24
Número de grãos por vagem	18	168,08*	2,92 c	8,28 b	12,71 a	32,78
Tamanho de vagens	18	128,31*	9,14 b	14,00 a	17,67 a	20,71
Quantidade de vagens	18	37,76*	1,57 c	2,57 b	6,00 a	32,27
Altura	18	217,09	48,58 a	38,39 a	39,60 a	24,68
Diâmetro	18	3,47	6,64 a	7,90 a	7,82 a	16,17
Clorofila Espectrofotômetro	18	8,61	15,75 a	17,92 a	17,24 a	33,95
Clorofila clorofilog	18	22,07	49,30 a	52,82 a	51,50 a	11,42
Hue	18	197,73*	61,77 b	64,28 b	71,97 a	4,75
Saturação	18	00,00*	0,05 b	0,09 a	0,09 a	20,93
Intensidade	18	00,00*	0,84 a	0,79 b	0,76 b	3,95
GA	18	0,03*	0,18 c	0,27 b	0,32 a	11,89
GGA	18	0,03*	0,04 b	0,03 b	0,15 a	30,33
CSI	18	2188,07*	75,69 a	86,16 a	51,68 b	11,75
Luminosidade	18	46,70*	87,50 a	84,64 ab	82,35 b	3,29
a	18	19,02*	-7,70 c	-9,44 b	-10,99 a	8,91
b	18	44,86*	19,33 b	23,76 a	23,67 a	9,14
u	18	1,00*	-1,46 b	-1,41 b	-2,09 a	15,21
v	18	73,32*	27,49 b	33,09 a	33,10 a	8,13

FV: fonte de variação; GL: grau de liberdade; QM: quadrado médio; CV: coeficiente de variação; \*: Significativo estatisticamente pelo teste F ( $p \leq 0,05$ ). Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Fonte: Autor

Não houve diferença entre as cultivares de feijão-caupi para as características altura e diâmetro, por outro lado, para a quantidade e tamanho de vagens, o número de grãos por vagem e produtividade por vaso, avaliadas por meio de técnicas de fenotipagem tradicionais, ocorreram diferenças significativas entre os tratamentos, bem como os elementos Hue, saturação, intensidade, GA, GGA, CSI, luminosidade, a\*, b\*, u\* e v\* obtidos através de análises de imagens RGB. Não houve diferença para as estimativas de teores de clorofila em ambas as técnicas.

Quanto a produtividade, a cultivar Pingo de Ouro apresentou maior média (7,99g) quando comparada às cultivares BRS Nova Era (3,66g) e BRS Guariba (1,41g).

O valor de coeficiente de variação (CV%) oscilaram entre 3,29% e 36,24%, sendo considerados valores de baixo a médio, indicando boa precisão experimental em experimentos de feijão-caupi (BERTINI et al., 2009). Nota-se que as avaliações tradicionais acumularam

maior percentual de CV em relação as porcentagens de avaliações por meio de imagens. Isto aponta maior variabilidade das informações obtidas através de técnicas tradicionais, compondo um grupo de dados mais heterogêneo.

A avaliação dos componentes diretos de produtividade (tamanho de vagens, número de grãos por vagem e quantidade de vagens) apontaram que a cultivar com maior índice de produção durante o experimento foi Pingo de Ouro. Apesar da variedade Pingo de Ouro apresentar maior número de vagens e grãos por vagens, o tamanho de vagens não diferiu estatisticamente da cultivar BRS Nova Era.

As avaliações de teste de médias das características altura e diâmetro não refletiram nos índices de produtividade das plantas. Oliveira et al. (2013) afirmam que em plantas de feijão-caupi de tipo de crescimento indeterminado, a altura da planta tem baixo efeito direto sobre a produtividade. O fato de as variedades analisadas terem este tipo de crescimento ressalta essa afirmativa, uma vez que as cultivares mais altas não foram necessariamente as mais produtivas.

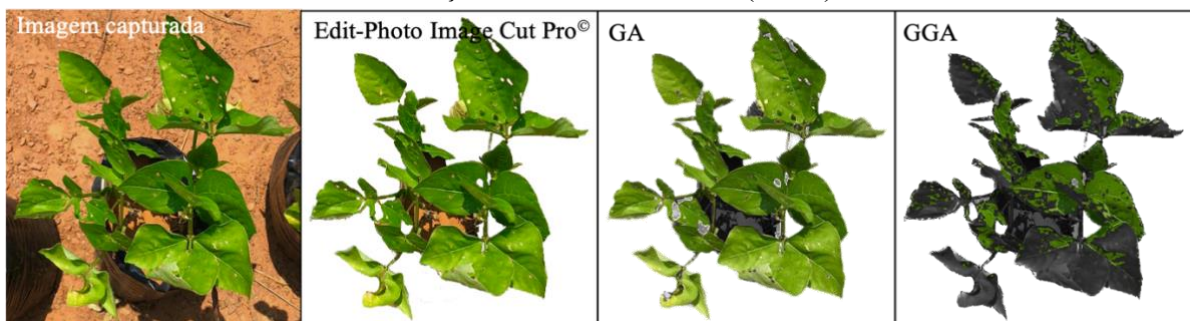
As avaliações dos teores de clorofila total não evidenciaram diferenças significativas entre as cultivares avaliadas, corroborando com Pinho et al. (2019) e Silva et al. (2019), que também não obtiveram diferenças estatísticas em avaliações de teores de clorofila em feijão-caupi. No entanto, deve-se atentar a relação entre os teores de clorofila e a eficiência da fotossíntese, pois quanto mais clorofila, maior será a produção de fotoassimilados que serão direcionados aos grãos resultando no aumento da produtividade (BASTOS, 2023). Estudos que avaliam o teor de clorofila em feijão-caupi ainda são escassos, o que se pode afirmar é que cultivares que tem o tipo de crescimento indeterminado apresentam sobreposição das fases vegetativa e reprodutiva, o que interfere na relação fonte/dreno e resulta em consequente mudança na distribuição dos fotoassimilados nas plantas adultas (OLIVEIRA et al., 2013).

Na análise de imagens, o parâmetro Hue indica a cor predominante na imagem através de uma associação entre os graus de uma circunferência de 360° e a disposição das cores no espaço de cores HIS. Este espaço de cor inicia com a cor vermelha no ângulo 0° do ponto Norte da circunferência, atravessando pelos espectros laranja e amarelo até chegar no verde. A transição de cores na circunferência ocorre de forma gradual, assim que no ângulo de 60° inicia com tonalidade amarela-esverdeada e a medida que avança em graus, a cor verde vai se tornando mais “pura” até o ponto de 180°, onde predomina a cor azul. Com isso pode-se afirmar que quanto mais o parâmetro HUE estiver adiante do ponto de 60° da circunferência, mais predominante será a cor verde na imagem. Houve diferença significativa para este parâmetro, onde a cultivar BRS Nova Era e BRS Guariba tiveram coloração média de imagem nos pontos 64,28° e 61,77°, respectivamente, enquanto a coloração média da cultivar Pingo de Ouro estava

no ponto 71,97°, diferindo positivamente das demais por possuir em suas folhas maior predominância da cor verde.

A aplicação de fórmulas utilizando dados do parâmetro Hue, permite que seja calculada a área verde relativa, mais verde relativa e índice de senescência das parcelas a partir da faixa de cores dos pixels contidos na imagem. A área verde relativa (GA) inclui os pixels na faixa Hue de 60° a 180°, que abrange todas as tonalidades de verde, desde tons amarelados ao verde azulado (BUCHAILLOT et al., 2022), e para calcular a área mais verde relativa (GGA) a faixa de cores é reduzida a zona de 80° a 180°, afim de enfatizar a quantidade de área foliar ativa, desprezando as tonalidades amareladas da imagem (Figura 2), o índice de senescência (CSI) é calculado com base nos valores de GA e GGA. A análise de GA, GGA e CSI foram significativas, apontando diferenças no desempenho dos genótipos avaliados, sendo que a cultivar Pingo de Ouro apresentou maior área verde (GA) e área mais verde (GGA), assim como menor valor calculado para o parâmetro CSI, o que significa menor quantidade da cor amarela associada ao dossel das plantas dessa cultivar.

Figura 2 – Imagem do dossel de feijão-caupi capturada a 80 cm da parte superior do vaso, processamento para remoção de imagens de segundo plano, avaliação de área verde (GA) e avaliação da área mais verde (GGA).



Fonte: Autor

A saturação avalia a tonalidade classificando de acordo com a quantidade de cinza presente na imagem, quanto mais próxima de 0, mais acinzentada é a cor. Neste parâmetro observou-se que as variedades BRS Nova Era e Pingo de Ouro são estatisticamente iguais com índices de 0,09% de saturação, enquanto a cultivar BRS Guariba teve um percentual de 0,05%, o que indica folhas com mais presença de cinza que as demais, ou seja, possui tom de verde mais claro que as outras cultivares.

A intensidade e luminosidade são medidas provenientes de modelos de imagens distintas, porém que indicam o mesmo parâmetro, mostrando tão claro ou quão escura é a cor avaliada, quanto mais alto o índice, mais clara é a cor presente na imagem. Estes parâmetros

também apresentaram significância, sendo BRS Guariba a cultivar com índices mais elevados o que indica tons de verde mais claros.

A avaliação dos componentes do espaço de cores CIELab também foram significativas, onde a cultivar Pingo de Ouro apresentou valor mais negativo de  $a^*$ , o que indica maior concentração da cor verde quando comparada as demais cultivares. Outro componente avaliado foi  $b^*$ , onde as cores amarela e azul são inversamente proporcionais, as cultivares Nova Era e Pingo de Ouro apresentaram maiores valores positivos, fazendo referência a predominância de cor amarela, podendo indicar nesses dois tratamentos maior índice de folhas em fase de senescência. Apontando assim, aceleração do ciclo dessas cultivares devido a interação genótipo x ambiente.

Os resultados com base no espaço de cores CIELuv, também se diferiram estatisticamente. O componente  $u^*$  é medido da esquerda para direita no sentido horizontal da imagem, onde à medida que o valor aumenta, mais se aproxima da cor vermelha. Para esta variável, as cultivares BRS Guariba e BRS Nova Era apresentaram maiores resultados, indicando haver maior quantidade de pixels com a tonalidade vermelha em suas imagens. Essa coloração está relacionada a quantidade de solo presente na imagem, ou seja, quanto maior quantidade de solo, menor a quantidade de folhas na relação planta/solo da imagem. O componente  $v^*$  move-se no espaço de cores, similarmente ao componente  $b^*$  de azul ao amarelo, onde valores mais positivos são relacionados a coloração amarela. Para este parâmetro os resultados também foram significativos, onde o maior valor foi expressado pela cultivar Pingo de Ouro, consolidando os resultados encontrados pela variável  $b^*$ .

A clorofila é o pigmento que dá coloração verde aos tecidos vegetais a partir da absorção de luz das regiões azuis e vermelhas do espectro eletromagnético. Este pigmento atua na conversão da radiação luminosa em energia química em forma de ATP (adenosina trifosfato) e NADPH (nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato reduzida), ou seja, no processo de obtenção de compostos orgânicos (CUNHA et al., 2023). Maiores quantidades de clorofila proporcionam aumento na taxa fotossintética na planta, refletindo em ganhos na produção de fotoassimilados (ZUFFO et al., 2019). Dessa forma, fica evidenciada a relação entre a coloração verde das folhas e a produtividade.

Os índices de Hue, Saturação, Intensidade, GA, GGA, CSI, Luminosidade,  $a^*$  e  $u^*$  estão todos associados ao grau da coloração verde nas imagens, e todos eles foram significativamente mais altos para valores expressados pela cultivar Pingo de Ouro, dessa forma, o esperado é que ao final do ciclo essa cultivar apresentasse maior produtividade em relação as demais, e foi o que ocorreu.

Para atestar a precisão dos índices obtidos através de imagens RGB na avaliação de diferenças no rendimento, foram realizadas estimativas de correlação entre a produção e características fenotípicas do feijão-caupi obtidos através de diferentes técnicas.

Foram avaliados sete caracteres com técnicas de fenotipagem tradicionais (altura, diâmetro de caule, número de vagens, tamanho de vagens, número de grãos por vagem, produtividade por vaso e clorofila com espectrofotômetro), medidor eletrônico de clorofila, e onze avaliações derivadas de imagens RGB (Hue, saturação, intensidade, GA, GGA, CSI, luminosidade, a\*, b\*, u\* e v\*) (Figura 3).

Figura 3 – Matriz de correlação entre os componentes de avaliação e desempenho produtivo, considerando três cultivares de feijão-caupi.

	GGA	TV	NG	QV	PRO	DIA	GA	SAT	b*	v*	CTC	AP	INT	LUM	CTE	CSI	a*	u*
HUE	0,81	0,68	0,74	0,76	<b>0,67</b>	0,47	0,63	0,17	0,28	0,33	0,27	0,02	-0,28	-0,19	0,05	-0,73	-0,84	-0,99
GGA	0,53	0,57	0,69	<b>0,66</b>	0,35	0,70	0,39	0,41	0,44	-0,05	-0,20	-0,47	-0,39	-0,06	-0,94	-0,78	-0,79	
TV	0,91	0,72	<b>0,69</b>	0,42	0,62	0,44	0,51	0,54	0,39	-0,17	-0,41	-0,31	0,01	-0,37	-0,72	-0,61		
NG	0,86	<b>0,77</b>	0,38	0,73	0,46	0,50	0,52	0,43	-0,19	-0,58	-0,50	-0,06	0,38	0,75	-0,66			
QV	<b>0,91</b>	0,12	0,70	0,34	0,35	0,36	0,26	-0,08	-0,62	-0,59	0,11	-0,58	-0,69	-0,71				
PRO	<b>0,05</b>	<b>0,72</b>	<b>0,40</b>	<b>0,41</b>	<b>0,42</b>	<b>0,13</b>	<b>-0,16</b>	<b>-0,64</b>	<b>-0,59</b>	<b>0,29</b>	<b>0,53</b>	<b>-0,65</b>	<b>-0,60</b>					
DIA	0,41	0,39	0,51	0,55	0,09	-0,28	-0,08	0,04	-0,30	-0,22	-0,64	-0,48						
GA	0,81	0,81	0,81	-0,14	-0,51	-0,87	-0,77	0,04	-0,45	-0,86	-0,56							
SAT	0,97	0,95	-0,27	-0,60	-0,76	-0,65	-0,09	-0,14	-0,63	-0,09								
b*	1,00	-0,27	-0,50	-0,66	-0,52	-0,09	-0,16	-0,74	-0,22									
v*	-0,24	-0,46	-0,61	-0,46	-0,10	-0,20	-0,78	-0,28										
CTC	0,27	0,21	0,19	-0,12	-0,03	0,00	-0,22											
AP	0,61	0,60	-0,31	-0,01	0,23	-0,09												
INT	0,98	-0,07	0,21	0,51	0,19													
LUM	-0,10	0,16	0,37	0,10														
CTE	0,08	0,03	-0,05															
CSI	0,60	0,73																
a*	0,82																	

□ p ≥ 0,05 (Não significativo)

□ p < 0,05

■ p < 0,01

■ p < 0,001

AP: altura; DIA: diâmetro; QV: quantidade de vagens; TV: tamanho de vagens; NG: número de grãos por vagem; PRO: produtividade por vaso; CTE: clorofila total medida com espectrofotômetro; CTC: clorofila total medida com clorofilog; HUE: descrição da cor no espaço de cores HIS; SAT: saturação; INT: intensidade; GA: área verde; GGA: área mais verde; CSI: índice de senescência de colheita; a: componente de cor a\* do CIELab; b: componente de cor b\* do CIELab; u: componente de cor u\* do CIELuv; v: componente de cor v\* do CIELuv. Fonte: Autor.

Nota-se que as relações positivas significativas de maiores valores foram avaliadas por meio de técnicas tradicionais, porém, são fatores que estão diretamente ligados as análises de produtividade (QV, NG, TV), ou seja, são avaliadas apenas no final do ciclo produtivo dessa espécie. Esse tipo de correlação já era esperado, uma vez que a produtividade é resultado da quantidade de vagens e número de grãos por vagens que o feijoeiro consegue produzir.

Os índices Hue ( $R^2 = 0,67$ ), GA ( $R^2 = 0,72$ ), e GGA ( $R^2 = 0,66$ ) derivados de imagens RGB captadas no início do florescimento, também mostraram ter forte correlação positiva com a produtividade, uma vez que essas variáveis estão associadas a coloração verde.

O índice de senescência de colheita (CSI), associado aos pixels com tons amarelados na imagem, pode estar associado a vários fatores que contribuem para a queda de produtividade, como ataque de pragas e doenças, deficiência nutricional, deficiência hídrica, ou até mesmo a antecipação da fase de senescência ocasionada por condições climáticas. Este fator apresentou correlação significativa inversamente proporcional aos dados de produtividade, o que possibilita sua utilização como indicador indireto de produtividade.

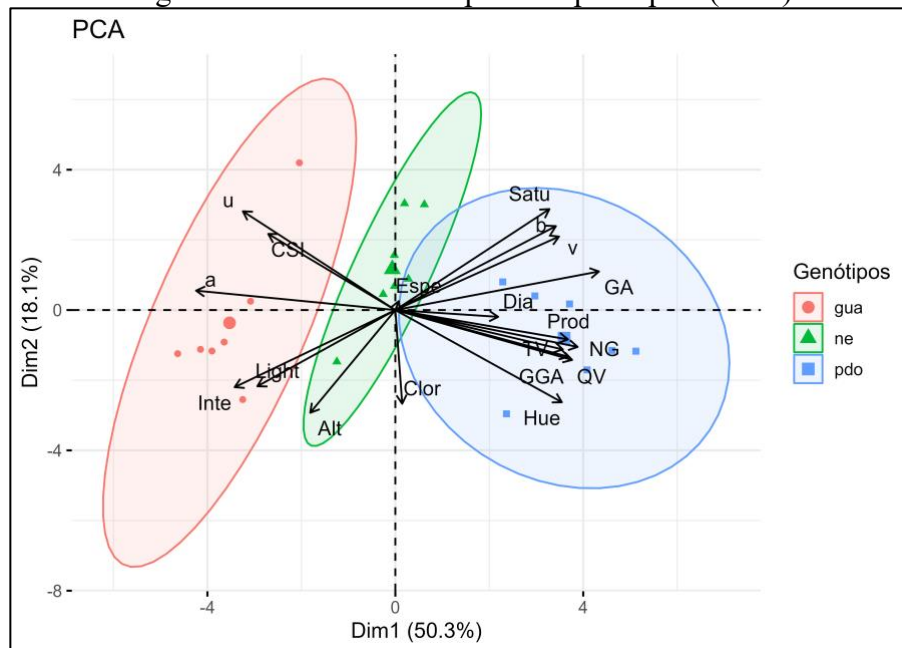
O fator  $u^*$  também apresentou relação inversamente proporcional a produtividade, caracterizado pela cor vermelha, esta pigmentação é associada a quantidade de solo presente na relação solo/vegetação da imagem. Segundo Silva et al. (2022) as folhas são órgãos fotossintéticos, responsáveis pela formação de fotoassimilados durante o processo de fotossíntese nas plantas, dessa forma, quanto maior o valor de  $u^*$ , menor presença de folhas na copa das plantas, e conseqüentemente, menor a produtividade. Esta relação fica evidenciada por meio deste componente de avaliação.

Embora o fator  $a^*$  apresente correlação negativa à produtividade, é importante ressaltar a forma que este parâmetro é interpretado em sua avaliação, de forma que quanto mais negativo for este valor, maior a concentração de verde na imagem. Assim, menor valor de  $a^*$  indica maior quantidade de vegetação da parcela, podendo também ser inversamente associado a produtividade.

A luminosidade e intensidade, assim como no teste de Tukey, foram significativos. Quanto maior o valor, mais clara será a tonalidade do verde. Estas variáveis podem indicar o surgimento de folhas novas. O fato das cultivares avaliadas serem de crescimento indeterminado influenciaram este parâmetro.

A análise de componentes principais é uma análise multivariada em que os fatores são agrupados de acordo com o grau de relação entre elas. Na Figura 4 é possível observar o agrupamento dos fatores avaliados em função das cultivares avaliadas, onde a soma dos valores de Dim, indica a precisão da análise que para esta avaliação foi de aproximadamente 70%.

Figura 4 – Análise de componente principais (PCA)



Gua: cultivar BRS Guariba; ne: cultivar BRS Nova Era; pdo: cultivar Pingo de Ouro; a: componente de cor a\* do CIELab; CSI: índice de senescência de colheita; Espe: clorofila total medida com espectrofotômetro; Light: luminosidade; Inte: intensidade; Alt: altura; Clor: clorofila total medida com clorofilog; u: componente de cor u\* do CIELuv; v: componente de cor v\* do CIELuv; b: componente de cor b\* do CIELab; Satu: saturação; GA: área verde; Dia: diâmetro do caule; Prod: produtividade de grãos; QV: quantidade de vagens; NG: número de grãos por vagem; TV: tamanho de vagem; GGA: área mais verde; HUE: descrição da cor no espaço de cores HIS. Fonte: Autor

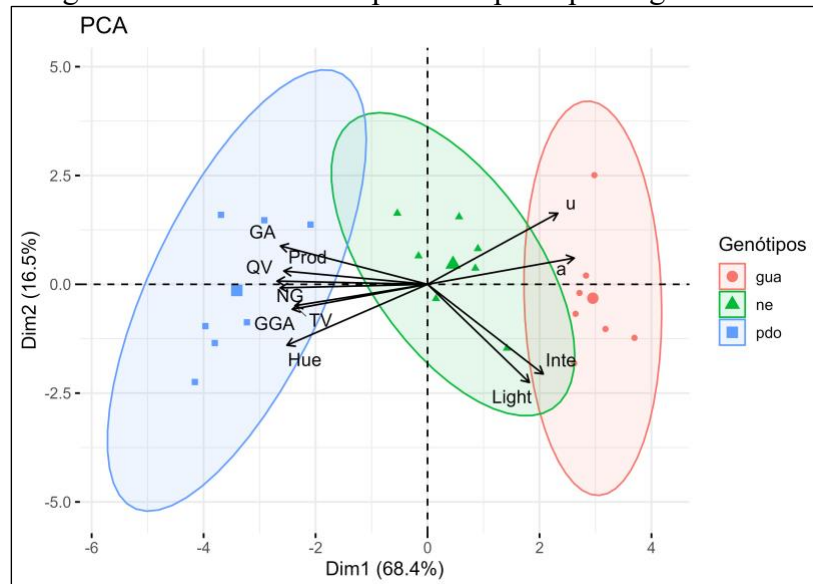
Os componentes de avaliação reunidos dentro da mesma elipse, indicam maior relação entre eles. É possível observar que os componentes de avaliação direta da produtividade (quantidade e tamanho de vagens, número de grãos por vagem e produtividade) em conjunto com os componentes avaliativos que indicam coloração verde nas avaliações de imagem RGB estão agrupados como indicadores avaliativos do desempenho da cultivar Pingo de Ouro, representadas pela cor azul, que por sua vez foi a mais produtiva. A cultivar BRS Guariba agrupa os componentes com tons de verde claro, amarelo e vermelho, podendo ser associada a menor taxa fotossintética e produção de fotoassimilados, resultando em menor taxa produtiva.

Observa-se que os resultados praticamente não variam, confirmando as estabilidades observadas na Tabela 2 e Figura 3.

Embora o teste F e Correlação de Pearson não tenham indicado significância nas análises de clorofila, nesta avaliação é possível observar a influência destes parâmetros no desempenho das cultivares. O agrupamento dentro das cultivares Pingo de Ouro e BRS Nova Era é associado as cultivares com maiores índices de clorofila.

Quando se reduz os componentes de avaliação apenas aos componentes significativos (Figura 5), a visualização dos parâmetros de maior influencia sobre a produtividade fica mais evidente.

Figura 5 – Análise de componentes principais significativos



Gua: cultivar BRS Guariba; ne: Cultivar BRS Nova Era; pdo: Cultivar Pingo de Ouro; a: componente de cor a do CIELab; Light: luminosidade; Inte: intensidade; GA: área verde; Prod: produtividade de grãos; QV: quantidade de vagens; NG: número de grãos por vagem; TV: tamanho de vagem; GGA: área mais verde; HUE: descrição da cor no espaço de cores HIS; u: componente de cor u do CIELuv. Fonte: Autor.

Quando essas avaliações são afuniladas, o valor de Dim é ampliado, o que significa aumento na precisão da análise, que nesta imagem é de 84,9%. A partir dessa análise é possível afirmar que os elementos de avaliação de imagens RGB Hue, GA e GGA foram os parâmetros melhor correlacionados ao rendimento. Os resultados confirmam as conclusões de Buchailot et al. (2018), que indicaram que os índices RGB Hue, GGA e GA obtidos a partir de imagens, apresentaram correlações mais fortes com a produtividade de grãos, superando outros índices baseados em RGB.

Os elementos  $a^*$  e  $u^*$  foram inversamente proporcionais a produção, podendo ser utilizados como parâmetros indiretos de produção para tomada de decisão em um programa de melhoramento.

#### 4 CONCLUSÕES

- A cultivar Pingo de Ouro apresentou maior produtividade de grãos por vaso, quando comparada as cultivares BRS Nova Era e BRS Guariba;

- Os elementos de análise de imagens que melhor se correlacionaram com o rendimento produtivo foram HUE, GA e GGA, que estão relacionados principalmente a cor verde da vegetação do dossel;

- Os resultados sugerem que avaliações de imagens RGB tem potencial de ponderar diferenças de rendimento da cultura do feijão-caupi, apresentando resultados aproximados de análises diretas de produtividade, podendo ser utilizados como ferramenta de avaliação em programas de melhoramento genético para seleção de genótipos com componentes de rendimento de alto desempenho.

## REFERÊNCIAS

- ARNON, D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts: polyphenoloxidases in *Beta vulgaris*. **Plant Physiology**, Maryland, v. 24, p. 1-15, 1949.
- BASTOS, J. S. **Respostas do feijão caupi em função do uso de doses de potássio**. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Agronomia. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano. Posse-GO, 2023.
- BERTINI, C. H. C. M.; TEÓFILO, E. M.; DIAS, F. T. C. Divergência genética entre acessos de feijão-caupi do banco de germoplasma da UFC. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 40, n. 1, p. 99-105, 2009.
- BUCHAILLOT, M. L.; CAIRNS, J.; HAMADZIRIPI, E.; WILSON, K.; HUGHES, D.; CHELAL, J.; MCCLOSKEY, P.; KEHS, A.; CLINTON, N.; ARAUS, J. L.; KEFAUVER, S. C. Regional monitoring of Fall Armyworm (FAW) using early warning systems. **Remote Sensing**, v. 14, n. 19, p. 5003, 2022.
- BUCHAILLOT, M. L.; GRACIA-ROMERO, A.; VERGARA-DIAZ, O.; ZAMAN-ALLAH, M. A.; TAREKEGNE, A.; CAIRNS, J. E.; PRASANNA, B. M.; ARAUS, J. L.; KEFAUVER, S. C. Evaluating maize genotype performance under low nitrogen conditions using RGB UAV phenotyping techniques. **Sensors**, v. 19, p. 1815, 2019.
- BUCHAILLOT, M. L.; GRACIA-ROMERO, A.; ZAMAN-ALLAH, M. A.; TAREKEGNE, A.; PRASANNA, B. M.; CAIRNS, J. E.; ARAUS, J. L.; KEFAUVER, S. C. Evaluating the performance of different commercial and pre-commercial maize varieties under low nitrogen conditions using affordable phenotyping tools. In: **Proceedings**. MDPI, p. 366. 2018.
- CARVALHO, L. M.; LUZ, M. S.; FREIRE, L. S.; ROCHA, M. M. Influência do tratamento térmico frente aos compostos antinutricionais em feijão-caupi. **Nutrivisa**, v. 10, e10015, 2023.
- CASADESÚS, J.; KAYA, Y.; BORT, J.; NACHIT, M. M.; ARAUS, J. L.; AMOR, S.; FERRAZZANO, G.; MAALOUF, F.; MACCAFERRI, M.; MARTOS, V. Using vegetation indices derived from conventional digital cameras as selection criteria for wheat breeding in water-limited environments. **Annals of Applied Biology**, v. 150, p. 227-236, 2007.
- CASADESÚS, J.; VILLEGAS, D. Simple digital photography for assessing biomass and leaf area index in cereals. **Bio-protocol**, v. 5, n. 11, p. e1488, 2015.
- CAVALCANTE, W. S. da S.; da SILVA, N. F.; TEIXEIRA, M. B.; ZANOTTO NETO, G.; CABRAL FILHO, F. R.; CUNHA, F. N.; CORRÊA, F. R. Technologies and innovations in the use of drones in agriculture. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 1, p. 7108-7117, jan. 2022.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: Safra de grãos – Estimativa em maio/2023**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2023.
- CUNHA, L. do S.; DUARTE JUNIOR, J. B.; LANA, M. do C.; RIBEIRO, L. L. O.; SHIMADA, B.; RICHART, A.; da COSTA, A. C. T.; ROSA, W. B. Agronomic characteristics of soybean as a function of inoculation, co-inoculation and N doses on eutrophic red latosol. **Concilium**, v. 23, n. 10, p. 473-488, 2023.

DUBREUIL, V.; FANTE, K. P.; PLANCHON, O.; NETO, J. L. S. A. Les types de climats annuels comme marqueurs du changement climatique au Brésil de 1964 a 2015. **Revista Franco-Brasileira de Geografia**, v. 37, n. 1, p. 406-411, 2018.

EL-HADDAD, G.; KEFAUVER, S. **Software Development – MaizeScanner**. CIMMYT - Universidade de Barcelona/Departamento de Biologia Vegetal. Disponível em: <https://integrativecropecophysiology.com/software-development/maizescanner/>. Acesso em: 12 jun. 2023.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Embrapa Solos, p. 74, 2013.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sócioeconomia**. Dados conjunturais da produção, produtividade e área cultivada do arroz e do feijão-comum do Brasil: dados de conjuntura da produção de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) e caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) no Brasil (1985 - 2022). Embrapa Arroz e Feijão. Disponível em: <https://www.cnraf.embrapa.br/socioeconomia/index.htm>. Acesso em: 30 ago. 2024.

FAO. **Banco de dados FAOSTAT**. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>. Acesso em: 15 maio 2023.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. de M.; E SILVA, K. J. D.; NOGUEIRA, M. do S. da R.; RODRIGUES, E. V. **Feijão-caupi no Brasil: produção, melhoramento genético, avanços e desafios**. Embrapa Meio-Norte, 2011.

GRACIA-ROMERO, A.; VERGARA-DÍAZ, O.; THIERFELDER, C.; CAIRNS, J. E.; KEFAUVER, S. C.; ARAUS, J. L. Phenotyping conservation agriculture management effects on ground and aerial remote sensing assessments of maize hybrids performance in Zimbabwe. **Remote Sensing**, v. 10, n. 349, 2018.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In: PACKER, L.; DOUCE, R. (Eds.). **Methods in Enzymology**. London: Academic Press, p. 350-381, 1987.

OLIVEIRA, J. L. M. **Levantamento de hortaliças cultivadas em hortas domésticas no município de São Carlos e principais fitopatologias associadas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal de São Carlos, 2021. 57 p.

OLIVEIRA, O. D. de. **Manejo de suculentas como alternativa à produção urbana – Relato de experiência**. Areia: UFPB/CCA, 2022. 36 f.

OLIVEIRA, O. M. S.; SILVA, J. F.; FERREIRA, F. M.; KLEHM, C. S.; BORGES, C. V. Associações genotípicas entre componentes de produção e caracteres agronômicos em feijão-caupi. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 4, p. 851-857, out.-dez. 2013.

PINHO, P. D. S.; COSTA, A. D. O.; da CRUZ, L. R.; MATTAR, E.; SIVIERO, A. Desenvolvimento morfofisiológico de feijão caupi inoculado com *Bradyrhizobium* em sistemas de cultivo na Amazônia Ocidental. In: **Congresso Nacional de Feijão-caupi, 5., Fortaleza. Sustentabilidade e inovações tecnológicas para o feijão-caupi: desafios e perspectivas: anais**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará: Embrapa Meio-Norte, 2019.

POINTER, M. R. A comparison of the CIE 1976 color spaces. **Color Research & Application**, v. 6, n. 2, p. 108-118. doi:10.1002/col.5080060212, 2009.

PRADO, E. V. Fenotipagem de plantas por meio de ferramentas digitais. **Revista Gestão em Foco**, Edição n. 15, Amparo, SP, 2023.

QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M.; PINTO, F. de A. de C.; BORÉM, A. **Agricultura Digital – 2ª Edição**. São Paulo: Oficina de Textos, 2022. 224 p. ISBN 978-65-86235-55-5.

SANTOS, P. E. de C.; SOUZA, P. I. de M.; CARMONA, R.; FAGIOLI, M.; SPEHAR, C. R.; BÔAS, H. D. da C. V. Semente é tecnologia. **Especial ABRASEM – Agroanalysis**, p. 31-37, mar. 2014.

SCHINDELIN, J.; ARGANDA-CARRERAS, I.; FRISE, E.; KAYNIG, V.; LONGAIR, M.; PIETZSCH, T.; CARDONA, A. Fiji: uma plataforma de código aberto para análise de imagem biológica. **Métodos da Natureza**, v. 9, n. 7, p. 676-682, 2012. doi:10.1038/nmeth.2019.

SILVA, C. F.; DE MOURA, M. F.; VILELA, Á. R. R.; DE ARAÚJO, M. B.; MARQUES, J. D. S. Produção de feijão-caupi em função do emprego de inoculante e adubos orgânicos e mineral. **Diversitas Journal**, v. 4, n. 3, p. 1130-1145, 2019.

SILVA, F. G. da; SUASSUNA, J. F.; de LEÃO, J. M.; da CONCEIÇÃO, D. S.; VAZ, J. B.; da CONCEIÇÃO, D. S. Inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* associada à adubação nitrogenada na produção do feijão-caupi em solo florestal. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, p. e47511932151-e47511932151, 2022.

SOUSA, C. A. F. **Comunicado Técnico 06 – Fenotipagem de plantas: uma nova abordagem para um velho problema**. Embrapa, Brasília-DF, jun. 2014. ISSN 2177-4447.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2004. 416 p.

ZAMAN-ALLAH, M.; VERGARA, O.; ARAUS, J. L.; TAREKEGNE, A.; MAGOROKOSHO, C.; ZARCO-TEJADA, P. J.; HORNERO, A.; HERNÁNDEZ ALBÀ, A.; DAS, B.; CRAUFURD, P.; OLSEN, M.; PRASANNA, B. M.; CAIRNS, J. Unmanned aerial platform-based multi-spectral imaging for field phenotyping of maize. **Plant Methods**, v. 11, n. 35, 2015.

ZHANG, F. **Photo Edit - Photo Image Cut Pro versão 3.1.5**. Software UT, 2023. Disponível em: <https://apps.apple.com/us/app/photo-edit-photo-image-cut/id1472678688>. Acesso em: 22 ago. 2024.

ZUFFO, A. M.; STEINER, F.; BUSCH, A.; SANTOS, D. M. da S. A adubação nitrogenada na soja inibe a nodulação e não melhora o crescimento inicial das plantas. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 2, p. 333-349, abr./jun. 2019.

## CAPÍTULO II

### ÉPOCAS DE AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DE FEIJÃO-CAUPI ATRAVÉS DE IMAGENS DE BAIXO CUSTO

#### RESUMO

A fotogrametria aplicada à agricultura é uma ferramenta eficiente e acessível para medir características fenotípicas, essencial para determinar o momento ideal de avaliação de culturas por imagem. Este estudo buscou identificar a época mais adequada para a avaliação de rendimento do feijão-caupi, utilizando técnicas de análise fenotípica baseadas em imagens RGB. O estudo foi conduzido no estado de Tocantins, região Norte do Brasil, nos anos agrícolas 2022 e 2023. O experimento foi conduzido em DBC, com 9 linhagens e uma testemunha comercial de feijão-caupi, em 4 repetições. As imagens foram capturadas utilizando drone equipado com câmera RGB em cinco estádios de desenvolvimento (V3, V7, R5, R7 e R9) e analisadas com o software Breedpix 2.0, que forneceu valores para os parâmetros de Hue, GA e GGA. Também foram avaliadas altura da planta (AP), peso de mil sementes (PMS) e produtividade (PRO). Os dados passaram por análise de variância (teste F) e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%, utilizando o SISVAR® 5.7. Para avaliar a relação entre as variáveis, foi realizada correlação de Pearson utilizando o software estatístico Jamovi. Houve diferença estatística para o PMS, AP, Hue em V3, V7 e R9, GA em V3, R7 e R9, GGA em V3, R7 e R9. A fase R5 foi identificada como a mais adequada para avaliar o rendimento do feijão-caupi por imagens RGB, oferecendo análise precisa dos parâmetros desejados.

**Palavras-chave:** *Vigna unguiculata*. imagens RGB. sensoriamento remoto. produtividade.

#### ABSTRACT

Photogrammetry applied to agriculture is an efficient and accessible tool for measuring phenotypic characteristics, essential for determining the ideal time for crop evaluation by imaging. This study sought to identify the most appropriate time for cowpea yield evaluation, using phenotypic analysis techniques based on RGB images. The study was conducted in the state of Tocantins, northern region of Brazil, in the agricultural years 2022 and 2023. The experiment was conducted in DBC, with 9 cowpea lines and a commercial control, in 4 replicates. The images were captured using a drone equipped with an RGB camera at five development stages (V3, V7, R5, R7 and R9) and analyzed with the Breedpix 2.0 software, which provided values for the Hue, GA and GGA parameters. Plant height (AP), thousand seed weight (PMS) and productivity (PRO) were also evaluated. The data were subjected to analysis of variance (F test) and the means were compared by the Tukey test at 5%, using SISVAR® 5.7. To evaluate the relationship between the variables, Pearson correlation was performed using the Jamovi statistical software. There was a statistical difference for PMS, AP, Hue in V3, V7 and R9, GA in V3, R7 and R9, GGA in V3, R7 and R9. The R5 phase was identified as the most suitable for evaluating cowpea yield by RGB images, offering accurate analysis of the desired parameters.

**Keywords:** *Vigna unguiculata*. RGB images. Remote sensing. Productivity

## 1 INTRODUÇÃO

A fotogrametria aplicada a agricultura tem se mostrado uma ferramenta barata e eficiente para os mais diversos fins, que vão desde a fotointerpretação ao emprego de softwares para exploração de dados mais específicos.

Os VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados), popularmente conhecidos como drones, possuem a capacidade de produzir imagens de altíssima qualidade, cobrindo centenas de hectares em um único voo. Com baixo custo, essa técnica possibilita a coleta de informações da área avaliada, como a capacidade de retenção de água no solo, contagem de plantas, taxa de crescimento e detecção de doenças (GONÇALVES, 2023).

Para que a coleta de dados seja bem sucedida é necessário a utilização de câmeras adequadas, as câmeras mais indicadas para este fim são as contempladas pelas tecnologias de sensores RGB e a multiespectral. As análises de imagens provenientes de câmeras multiespectrais têm metodologias bem definidas e padronizadas de calibração, que possibilitam fazer comparações durante avaliações fenotípicas, e custam de 15 mil a 200 mil reais. Por outro lado, câmeras RGB têm preços acessíveis e estão inclusive na câmera de celulares, onde capturam fotografias como uma espécie de “raio x” da plantação, e a homogeneidade de luz no momento de captura das imagens é suficiente para notar diferença na variação de cor entre as plantas ou realizar análises através de softwares (ROSAS, 2020).

O fenótipo é o conjunto de características, resultante das interações entre genótipo e ambiente, ou seja, a promoção da expressão gênica da cultura de acordo com o ambiente em que está sendo cultivado. A fenotipagem é a aplicação de métodos e protocolos para medir traços estruturais morfológicos, traços funcionais fisiológicos, e traços de conteúdo de componentes de células, tecidos, órgãos, dossel, plantas inteiras ou até mesmo populações (HICKEY et al., 2019).

A medição de características fenotípicas é uma ferramenta importante para a identificação e seleção de genótipos com caracteres de interesse dentro de um programa de melhoramento genético. A avaliação fenotípica através de imagens pode reduzir significativamente o tempo de avaliação em comparação com métodos tradicionais, devido principalmente a alta escalabilidade (SHAKOOR et al., 2017). Este é um avanço considerado importante para o melhoramento de plantas, pois quanto antes essas medições puderem ser realizadas, mais rápida será a identificação das linhagens mais promissoras. Com medições antecipadas, os melhoristas poderão se organizar melhor para as próximas etapas, otimizando todo o processo de seleção.

Considerando que plantas em desenvolvimento estão em constante crescimento, as mudanças na forma do dossel são primordiais para identificação do momento ideal da avaliação

de culturas através de imagem. Folhas e outros órgãos que realizam a fotossíntese atuam na captação de energia solar, dessa forma, a arquitetura do dossel afeta a quantidade e qualidade da radiação solar que é absorvida e utilizada na produção dos compostos orgânicos pelos vegetais (GIANASI, 1999).

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) é uma cultura de ciclo rápido, com duração variando de 60 a 90 dias. O desenvolvimento da planta passa pelas fases vegetativa e reprodutiva. A fase vegetativa, inicia-se com a germinação da semente (V0) e seguinte emergência dos cotilédones (V1), seguida pela formação das folhas primárias (V2) e posterior crescimento das folhas compostas trifoliadas (V3, V4, V5, V6, V7, ... Vn), fechando o dossel entre as linhas de semeadura. Após 30 a 45 dias da germinação, ocorre a indução floral, marcando o início da fase reprodutiva (R5). Em cultivares de crescimento determinado, as plantas interrompem o desenvolvimento de novas folhas, enquanto em cultivares de crescimento indeterminado, o crescimento vegetativo continua simultaneamente à fase de floração (R6), que leva à formação de vagens (R7). Em condições ideais, as vagens se enchem de grãos (R8) e a maturação ocorre de 60 a 90 dias após a germinação (R9). (OLIVEIRA et al., 2023; ALMEIDA, 2006).

Estudos recentes sobre outras culturas como o milho (ABREU JÚNIOR et al., 2023) e arroz (BASCON, et al., 2022), demonstraram que a melhor fase fenológica para a estimativa de rendimento usando imagens é durante a fase reprodutiva, mais precisamente durante a fase de enchimento dos grãos. Essa fase é crítica porque a densidade da vegetação e enchimento dos grãos estão diretamente relacionados ao potencial de rendimento da planta (BASTOS et al., 2020). Além disso, outro estudo sobre trigo utilizou imagens coletadas em diferentes estádios de crescimento, incluindo o enchimento de grãos, para prever o rendimento com alta precisão usando modelos de aprendizado de máquina. Os índices de vegetação calculados a partir dessas imagens apresentaram alta correlação com o rendimento dos grãos, especialmente durante o estágio médio de enchimento de grãos (FERNANDEZ-GALLEGO et al., 2019).

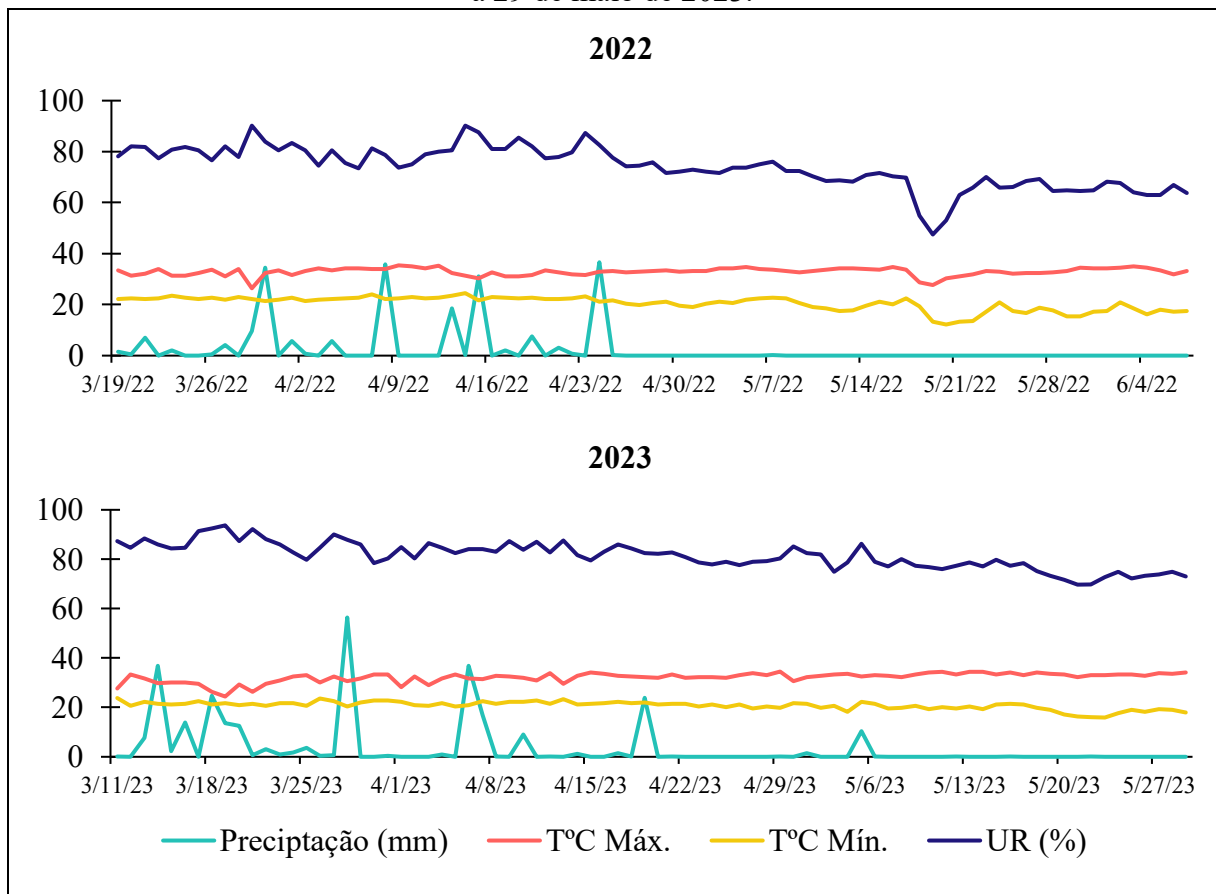
Entretanto, até o momento, não foram realizados estudos diretos para determinar o estágio fenológico mais apropriado para avaliar o rendimento do feijão-caupi utilizando imagens. Com isso, objetivou-se com este trabalho determinar a melhor época para avaliação fenotípica de rendimento do feijão-caupi utilizando imagens de baixo custo. Ao fornecer dados fenotípicos detalhados e temporais, será possível selecionar de forma mais eficaz variedades com características desejáveis, antecipando a identificação de cultivares superiores e resistentes a condições adversas, e, conseqüentemente, promovendo avanços significativos na produtividade, sustentabilidade, segurança alimentar e na economia agrícola.

## 2 METODOLOGIA

O estudo foi conduzido na estação experimental da Universidade Federal do Tocantins, situada no município de Gurupi, no estado de Tocantins, região Norte do Brasil, durante os anos agrícolas 2022 e 2023. O clima desta área é tropical (Aw na classificação de Köppen), caracterizado por duas estações bem definidas: uma chuvosa e outra seca (DUBREUIL et al., 2018).

Durante a condução experimental, dados climáticos foram coletados diariamente, incluindo temperatura, precipitação e umidade relativa (INMET, 2024). Estes dados estão apresentados na Figura 1. Na ausência de chuvas, foi utilizado irrigação suplementar por aspersão.

Figura 1 – Dados climáticos (precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima e umidade relativa do ar) da área experimental da Universidade Federal do Tocantins, *Campus* de Gurupi, nos períodos de 19 de março de 2022 a 7 de junho de 2022 e 11 de março de 2023 a 29 de maio de 2023.



Fonte: Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2024).

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com nove linhagens de feijão-caupi (FC 208, FC 406, FC 602, FC 1103, FC 1402, FC 2006, FC 2007, FC

2009 e FC 2309) cedidas pela empresa Cerrado's Seeds Ltda, e uma testemunha comercial (Pingo de Ouro), com quatro repetições. Cada parcela experimental foi constituída por quatro linhas de 5,0 m de comprimento, espaçadas 0,5 m entre as fileiras e densidade final de 10 plantas por metro linear.

O solo da área, segundo classificação da Embrapa (SANTOS, 2018) é um Latossolo Vermelho – Amarelo distrófico de textura média, o qual com base em resultados da análise físico-químicas, apresenta as seguintes características: 662 de areia ( $\text{g.kg}^{-1}$ ), 38 de silte ( $\text{g.kg}^{-1}$ ), 300 de argila ( $\text{g.kg}^{-1}$ ), 5,5 de pH ( $\text{CaCl}_2$ ), 1,5 de matéria orgânica ( $\text{dag.kg}^{-1}$ ), 10 de P ( $\text{mg.dm}^{-3}$ ), 78 de K ( $\text{mg.dm}^{-3}$ ), 1,8 de Ca ( $\text{cmolc.dm}^{-3}$ ), 0,7 de Mg ( $\text{cmolc.dm}^{-3}$ ), 0 de  $\text{Al}^{+3}$  ( $\text{cmolc.dm}^{-3}$ ), 1,5 de H+Al ( $\text{cmolc.dm}^{-3}$ ), 13 de Fe ( $\text{g.kg}^{-1}$ ) e saturação por base de 64%.

O sistema de preparo do solo foi de forma convencional, no qual realizou-se operações de gradagem do solo. A adubação de base foi realizada utilizando adubo no sulco, na dose de  $200 \text{ kg.ha}^{-1}$  (formulado NPK – 4:30:10). A adubação de cobertura foi realizada 25 dias após semeadura, utilizando  $50 \text{ kg.ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  e  $20 \text{ kg.ha}^{-1}$  de N, conforme recomendações para a cultura (SOUSA E LOBATO, 2004).

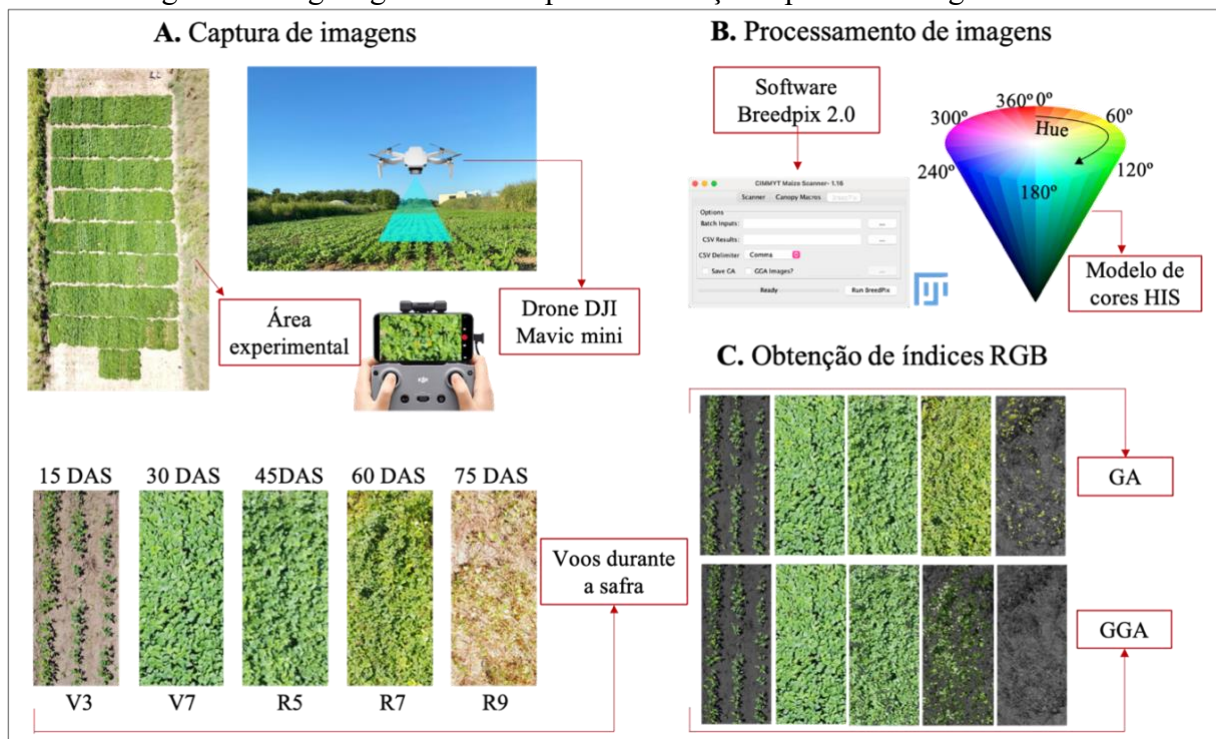
As sementes foram previamente tratadas com fungicidas (Benzimidazol e Fenilpiridinilamina) na dosagem de 180 mL de produto comercial por quilograma de sementes, e com inseticidas (Pirazol e Neonicotinóide) na dosagem de 350 mL de produto comercial por quilograma. A semeadura foi realizada de forma manual, com espaçamento de 10 cm entre sementes na linha, à profundidade de aproximadamente 3 cm.

O controle de plantas daninhas ocorreu de forma manual através de capina e quimicamente com aplicações dos herbicidas Sulfonilureia ( $40\text{g.ha}^{-1}$  de produto comercial) e Oxima ciclohexanodiona ( $450 \text{ mL.ha}^{-1}$  de produto comercial) quando necessário. Durante a condução experimental, a incidência de pragas foi controlada com aplicações de inseticidas dos grupos químicos Clorantraniliprole ( $100 \text{ mL.ha}^{-1}$  de produto comercial) e Neonicotinoide-Piretróide ( $125 \text{ mL.ha}^{-1}$  produto comercial), sempre mantendo os níveis de infestação abaixo do limiar de dano econômico.

A partir de 15 dias após a semeadura (DAS), quinzenalmente, foram capturadas imagens de cada parcela individualmente nos estádios V3 (15 DAS), V7 (30 DAS), R5 (45 DAS), R7 (60 DAS) e R9 (75 DAS), utilizando drone modelo Dji Mavic Mini equipado com câmera RGB com sensor CMOS de 1/2.3 polegadas e resolução de 12 megapixels. As imagens foram capturadas sempre ao meio-dia, afim de evitar sombreamento de uma planta sobre a outra, com a câmera posicionada em ângulo de  $90^\circ$  em relação à superfície do solo (Figura 2-A).

As imagens foram analisadas utilizando o software Breedpix 2.0, adaptado ao Java8 e outras análises de imagens RGB integradas com o plug-in CIMMYT Maize Scanner, disponível no pacote de processamento de imagens Fiji-2. Este software é administrado pelo Grupo Integrativo de Ecofisiologia de Culturas da Universidade de Barcelona (Espanha). A análise baseia-se nos modelos de cores HIS – Hue, Intensidade e Saturação – (Figura 2-B) permitindo a extração de informações sobre características da vegetação a partir dos componentes de cores e suas proporções dentro do dossel das plantas, associando-os a dados indicadores de produtividade (Figura 2-C).

Figura 2 – Organograma das etapas de avaliação a partir de imagens RGB.



Fonte: Autor

Os parâmetros avaliados a partir de imagens foram o fator Hue que avalia a cor pura numericamente ordenada em um círculo de cores de 360° no modelo de cores HIS, GA que apresenta a porcentagem de pixels verdes na imagem (variação de 60° a 180° no modelo de cores HIS), e GGA que avalia o índice de superfície verde eficiente (80° a 180° no modelo de cores HIS), excluindo tons que podem ser associados a estresses como o verde amarelado (ABROUGUI et al., 2022).

Como área útil para avaliações, foram consideradas as duas linhas centrais de cada parcela, desprezando-se 0,50 metros das extremidades de cada linha, com o propósito de diminuir o efeito bordadura.

Ao final do ciclo foram avaliadas em 10 plantas de cada parcela as seguintes características: altura da planta (AP) – medindo do meristema apical até o solo; peso de mil sementes (PMS) – calculado a partir do peso de 8 repetições de 100 sementes em gramas, onde multiplicou-se a média das repetições por 10; e produtividade de grãos (PRO) – obtido por meio da massa de grãos da área útil em quilogramas, com correção para 13% de umidade, transformando-os para  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

Inicialmente, cada ano foi analisado individualmente. Posteriormente, com base na análise dos quadrados médios do erro, conforme metodologia descrita por Gomes (2009), foi verificado que o ambiente experimental era homogêneo. Com essa constatação, procedeu-se à análise conjunta dos dados dos dois anos agrícolas.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o programa estatístico SISVAR<sup>®</sup> versão 5.7 (FERREIRA, 2014). Para avaliar a relação entre as variáveis, foi realizada correlação de Pearson utilizando o software estatístico Jamovi (THE JAMOVI PROJECT, 2021).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de dados pelo teste F, indicou diferença para altura de plantas (AP), peso de mil sementes (PMS), Hue em V3, R7 e em R9, GA em V3, R7 e em R9 e GGA em V3, R7 e em R9 (Tabela 1). As letras de significância estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 – Análise de variância de linhagens de feijão-caupi avaliadas por meio de técnicas tradicionais e análise de imagens.

FV	GL <sub>TOTAL</sub>	QM <sub>ERRO</sub>	F	P	CV (%)
AP	79	54,34*	3,560	0,0015	11,56
PMS	79	446,61*	4,131	0,0004	12,79
PRO	79	156899,83	1,791	0,0900	29
Hue V3	79	29,00*	3,191	0,0034	13,34
Hue V7	79	103,67	0,592	0,7981	14,34
Hue R5	79	13,86	1,599	0,1377	4,46
Hue R7	79	62,52*	2,569	0,0148	12,04
Hue R9	79	52,13*	3,206	0,0033	15,52
GA V3	79	0,00*	3,859	0,0007	38,94
GA V7	79	0,01	0,812	0,6070	19,88
GA R5	79	0,00	1,283	0,2660	4,71
GA R7	79	0,03*	2,275	0,0296	26,93
GA R9	79	0,01*	2,556	0,0153	47,96
GGA V3	79	0,00*	2,865	0,0074	64,53
GGA V7	79	0,02	0,776	0,6392	31,72
GGA R5	79	0,01	1,665	0,1191	18,16
GGA R7	79	0,01*	2,285	0,0289	64,06
GGA R9	79	0,00*	4,063	0,0005	73,88

\*: Significativo estatisticamente pelo teste F ( $p \leq 0,05$ ).

FV: fonte de variação; GL: grau de liberdade; QM<sub>ERRO</sub>: quadrado médio do erro; CV: coeficiente de variação; PDO: genótipo Pingo de Ouro; PMS: peso de mil sementes; AP: altura de planta; HUE V3: descrição da cor no espaço de cores HIS no estádio fenológico V3; HUE V7: descrição da cor no espaço de cores no estádio fenológico V7; HUE R5: descrição da cor no espaço de cores no estádio fenológico R5; HUE R7: descrição da cor no espaço de cores HIS no estádio fenológico R7; HUE R9: descrição da cor no espaço de cores HIS no estádio fenológico R9; GA V3: índice de área verde no estádio fenológico V3; GA V7: índice de área verde no estádio fenológico V7; GA R5: índice de área verde no estádio fenológico R5; GA R7: índice de área verde no estádio fenológico R7; GA R9: índice de área verde no estádio fenológico R9; GGA V3: índice de área mais verde no estádio fenológico V3; GGA V7: índice de área mais verde no estádio fenológico V7; GGA R5: índice de área mais verde no estádio fenológico R5; GGA R7: índice de área mais verde no estádio fenológico R7; GGA R9: índice de área mais verde no estádio fenológico R9. Fonte: Autor

Tabela 2 – Teste de médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

FV	FC 208	FC 406	FC 602	FC 1103	FC 1402	FC 2006	FC 2007	FC 2009	FC 2309	PDO
AP	64,02ab	62,56ab	58,11b	67,48ab	73,51a	59,52b	68,77ab	58,49b	61,70ab	63,48ab
PMS	177,62ab	154,44bc	140,90c	192,78a	168,96abc	157,12bc	151,71bc	159,79abc	175,15abc	173,24abc
PRO	1213,51a	1465,88a	1619,29a	1497,30a	1345,03a	1513,76a	1251,16a	1271,27a	1492,66a	990,53a
HueV3	42,04ab	44,64a	38,35ab	40,32ab	43,56a	41,70ab	36,30ab	42,26ab	41,08ab	33,56b
HueV7	71,95a	67,94a	67,11a	74,10a	74,35a	70,54a	70,35a	74,30a	67,66a	71,48a
HueR5	83,01a	83,23a	83,76a	84,19a	86,64a	84,20a	81,84a	80,82a	84,70a	81,95a

HueR7	64,88ab	61,93ab	68,75ab	66,09ab	67,70ab	73,78a	64,76ab	66,11ab	56,43b	66,20ab
HueR9	45,76ab	41,70b	45,21ab	49,22ab	44,15ab	55,24a	43,08b	52,28ab	41,24b	47,40ab
GA V3	0,15ab	0,18a	0,11abc	0,13abc	0,16ab	0,15ab	0,09bc	0,14abc	0,14abc	0,05c
GA V7	0,67a	0,62a	0,59a	0,71a	0,68a	0,67a	0,66a	0,72a	0,61a	0,66a
GA R5	0,97a	0,95a	0,95a	0,95a	0,96a	0,98a	0,94a	0,92a	0,97a	0,94a
GA R7	0,67ab	0,57ab	0,76ab	0,66ab	0,71ab	0,83a	0,66ab	0,69ab	0,48b	0,63ab
GA R9	0,25ab	0,22b	0,20b	0,30ab	0,27ab	0,44a	0,23ab	0,36ab	0,23ab	0,24ab
GGAV3	0,09a	0,11a	0,05ab	0,06ab	0,09a	0,08ab	0,04ab	0,08ab	0,08ab	0,01b
GGAV7	0,53a	0,46a	0,45a	0,59a	0,56a	0,51a	0,55a	0,61a	0,49a	0,57a
GGAR5	0,67a	0,72a	0,74a	0,72a	0,79a	0,74a	0,65a	0,61a	0,74a	0,63a
GGAR7	0,14ab	0,18ab	0,22ab	0,19ab	0,20ab	0,34a	0,16ab	0,16ab	0,11b	0,13b
GGAR9	0,03b	0,03b	0,01b	0,04b	0,04b	0,09a	0,03b	0,03b	0,04ab	0,02b

Médias seguidas de mesmas letras na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ( $p > 0,05$ ).  
Fonte: Autor

A linhagem FC 1402 apresentou altura média de 73,51 cm, sendo única a diferir das linhagens de menor altura. Vale ressaltar que essa linhagem apresentou rápido crescimento inicial e grande quantidade de massa verde durante todo o seu ciclo. Para a cultura do feijão-caupi ainda não se determinou a altura ideal de plantas de porte ereto visando a colheita mecânica. No entanto, segundo Simone et al. (1992), referindo-se ao feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), a altura média ideal para corte mecânico é em torno de 55 cm. Dessa forma, a altura média obtida por esta linhagem está acima em relação a média sugerida.

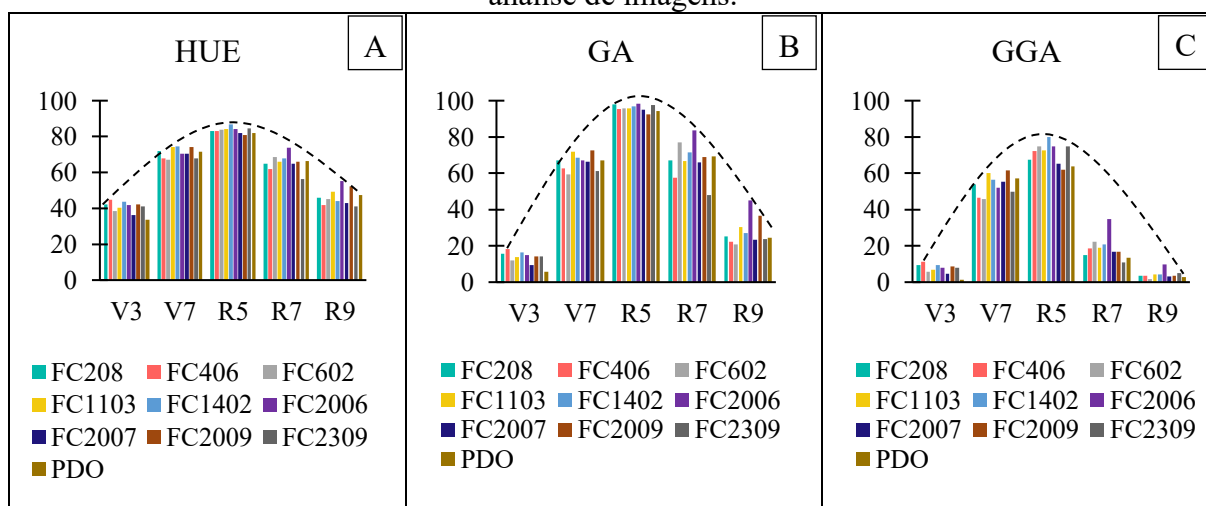
As linhagens também apresentaram diferença para PMS, onde a linhagem FC 1103 foi a única a diferir das linhagens de menor média para a mesma característica. Os resultados da análise de produtividade indicaram que não houve diferença entre as populações. O que sugere que na 8ª geração, as linhagens apresentaram um nível de homogeneidade produtiva, podendo ser atribuído ao processo de seleção ao longo das gerações anteriores (BORÉM e MIRANDA, 2013). Ao observar valores absolutos, nota-se que a linhagem FC 602 produziu cerca de 120 kg.ha<sup>-1</sup> a mais que a linhagem FC 1103. Isso ocorre porque uma linhagem pode produzir maior número de sementes por planta, compensando o menor peso individual de cada semente (SILVA et al., 2014) e, sabendo-se que a produtividade total é resultado da soma do peso de todas as sementes produzidas por planta, uma linhagem com muitas sementes leves pode ter produtividade total maior que uma com poucas sementes pesadas. Isso ocorre por diversos fatores, como adaptação ao ambiente, partição de biomassa, aspecto genéticos, ciclo de vida e maturação ou eficiência reprodutiva.

As imagens capturadas no início (V3) e final do ciclo (R7 e R9) da cultura também apresentaram dados significativos. Isso se deve à resposta diferenciada da germinação de sementes ao ambiente, e é uma ocorrência comum e esperada em programas de melhoramento genético devido a diferenças determinadas pelo fator genético (ADIE et al., 2021). Neste caso,

as linhagens apresentaram velocidades diferentes de desenvolvimento inicial, identificadas a partir do fator HUE, GA e GGA do estádio V3, que estão diretamente associadas a quantidade de massa verde produzida pelas plantas nas primeiras semanas de desenvolvimento, sendo as linhagens FC 406, FC 1402 e FC 208 as que apresentaram crescimento inicial mais rápido quando comparada a cultivar comercial Pingo de Ouro, que apresentou crescimento inicial mais lento. As folhas superiores do dossel são responsáveis por aproximadamente 70% da energia solar absorvida (SONG et al., 2013). Na soja, Rotch et al. (2022) mostraram que variedades com fechamento precoce do dossel têm maior rendimento, destacando a importância da alta eficiência de interceptação de luz. Cultivares com maior velocidade de germinação são de grande interesse em programas de melhoramento, pois tem maior potencial para competir com as plantas daninhas e sobressair a condições adversas como a presença de pragas e doenças.

As avaliações realizadas nos estádios R7 e R9 evidenciam as linhagens com maiores quantidades de massa foliar de cor verde nos estádios finais do ciclo, indicando que a planta ainda se encontra produzindo fotoassimilados, associando-os ao ciclo mais alongado. Na Figura 3 é possível visualizar essa evolução.

Figura 3 – Evolução de quantidade de massa verde durante o ciclo de feijão-caupi através da análise de imagens.



PDO: cultivar comercial Pingo de Ouro. Fonte: Autor

O parâmetro Hue avalia a cor verde em todos os tons presente na imagem, e por este motivo os resultados alcançam valores mais altos. Este parâmetro demonstrou que em R7 a linhagem FC 2006 foi a única a apresentar maior quantidade de massa verde quando comparada a linhagem FC 2309, que sinalizava indícios de finalização de ciclo. No estádio R9, marcado pela maturação fisiológica, a linhagem FC 2006 seguiu como o genótipo com maior teor de

matéria verde, quando comparado as linhagens FC 2309, FC 406 e FC 2007 que por sua vez, já estavam finalizando ciclo (Tabela 2 e Figura 3-A).

Os parâmetros GA (Figura 3-B) e GGA (Figura 3-C), são calculados a partir da porcentagem de pixels verdes da imagem, onde GA abrange as tonalidades que variam de 60° a 180° e GGA se restringe apenas a tonalidade verde eficiente, variando de 80° a 180°. Dessa forma, os tons verde-amarelados que podem ser associados a senescência são excluídos, e por este motivo o parâmetro GGA têm menor abrangência de valores em relação ao Hue e GA (SIE et al., 2022). Assim, é possível observar que a linhagem FC 2006 seguiu como a linhagens com maior teor de massa verde nos estádios R7 e R9 tanto para o parâmetro GA, como no GGA, pois foi a única a diferir dos tratamentos que apresentaram menor média.

Os fenótipos que apresentaram menor teor de matéria verde, quando comparados às de menores médias em R7 foram FC 2309 no parâmetro GA, e FC 2309 e PDO no parâmetro GGA, no estádio R9 o GA indicou menor massa verde para as linhagens FC 406 e FC 602, enquanto o GGA apontou as linhagens FC 602, PDO, FC 2007, FC 2009, FC 208, FC 406, FC 1103 e FC 1402 com menor percentual de pixels na cor verde pura, características esperadas para plantas no final do seu ciclo de desenvolvimento, que é quando as folhas começam a perder a sua cor verde vibrante tornando-as amarelas, em seguida secam e caem, processo comum em plantas anuais após maturação dos frutos.

A cultivar Pingo de Ouro (PDO), na avaliação realizada aos 15 dias no estádio V3 mostrou desenvolvimento inicial reduzido (HUE V3, GA V3 e GGA V3), refletindo no baixo número de vagens por plantas durante a fase reprodutiva. Isso ocorre porque o crescimento inicial lento resulta em plantas com sistema radiculares menos desenvolvidos, menos competitivas em relação às plantas daninhas e mais suscetíveis a estresses bióticos e abióticos.

A coloração verde está relacionada a parte saudável da vegetação (DE LA CASA et al., 2018), que por sua vez está fortemente associado a quantidade de fotoassimilados que as plantas estão produzindo em cada fase. Dessa forma, as análises a seguir fornecem informações fenotípicas das linhagens, buscando uma correlação entre a produtividade de sementes e a quantidade de massa verde calculada a partir de imagens RGB.

A avaliação por meio da correlação de Pearson indica o quanto uma variável tende a aumentar ou diminuir à medida que a outra variável aumenta ou diminui, amplamente utilizada para investigar e quantificar a relação entre diferentes conjuntos de dados. Neste trabalho, foi utilizada para comparar os resultados dos caracteres avaliativos através das imagens obtidas durante o desenvolvimento do feijão-caupi em campo, com dados de produtividade. Dessa forma, foi possível identificar em quais fases do desenvolvimento do feijão-caupi as imagens

forneem informações mais precisas, permitindo escolher o período ideal para fazer a avaliação com imagens RGB para tal cultura (Tabela 3).

Observa-se que as relações positivas significativas mais fortes entre a produtividade e as avaliações por imagens foram obtidas no período de pré-floraração em R5, sendo que o parâmetro GGA apresentou ter forte correlação positiva com a produtividade ( $R^2 = 0,79$ ). Isto ocorre porque o índice GA é uma medida mais simples, que calcula a área verde baseada na intensidade de todos os tons de verde, e o Hue é uma medida de cor que pode ser influenciada por vários fatores, como a presença de outros elementos, enquanto o GGA foca na cor verde pura, minimizando os efeitos que não estão diretamente relacionados a vegetação, ou seja, fornece uma medida mais específica e sensível das características espectrais das plantas, aproveitando melhor essa variação que reflete a saúde e densidade da vegetação (SIE et al., 2022).

Tabela 3 – Matriz de Correlação de Pearson entre desempenho produtivo e os componentes de avaliação.

	PRO	PMS	AP	HUE V3	HUE V7	HUE R5	HUE R7	HUE R9	GA V3	GA V7	GA R5	GA R7	GA R9	GGA V3	GGA V7	GGA R5	GGA R7	GGA R9
PRO	—																	
PMS	0,10	—																
AP	0,31	0,32	—															
HUE V3	0,40	0,10	0,11	—														
HUE V7	-0,15	0,09	0,00	0,10	—													
HUE R5	0,70	0,32	0,66	0,33	-0,03	—												
HUE R7	0,49	0,20	0,38	0,00	-0,14	0,47	—											
HUE R9	0,43	0,42	0,17	0,05	0,00	0,37	0,79	—										
GA V3	0,41	0,11	0,08	0,96	0,13	0,32	-0,02	0,00	—									
GA V7	-0,16	0,12	-0,03	0,11	0,93	-0,13	-0,18	0,03	0,14	—								
GA R5	0,66	0,35	0,51	0,24	-0,13	0,81	0,45	0,39	0,25	-0,19	—							
GA R7	0,47	0,17	0,36	-0,02	-0,18	0,46	0,99	0,76	-0,06	-0,22	0,46	—						
GA R9	0,50	0,46	0,27	0,23	-0,04	0,48	0,74	0,93	0,17	-0,01	0,51	0,71	—					
GGA V3	0,36	0,06	0,09	0,96	-0,01	0,27	-0,05	-0,00	0,93	0,02	0,23	-0,07	0,17	—				
GGA V7	-0,22	0,10	0,00	-0,01	0,92	-0,14	0,20	-0,01	0,01	0,92	-0,23	-0,23	-0,06	-0,10	—			
GGA R5	0,79	0,22	0,61	0,37	-0,15	0,96	0,47	0,33	0,35	-0,22	0,81	0,47	0,45	0,31	-0,25	—		
GGA R7	0,62	0,21	0,37	0,19	-0,19	0,59	0,87	0,76	0,17	-0,22	0,55	0,85	0,81	0,12	-0,26	0,62	—	
GGA R9	0,54	0,53	0,29	0,23	-0,14	0,45	0,56	0,68	0,21	-0,09	0,53	0,53	0,80	0,20	-0,17	0,46	0,69	—

□ :  $p \geq 0,05$  (Não significativo); □ :  $p < 0,05$ ; □ :  $p < 0,01$ ; □ :  $p < 0,001$

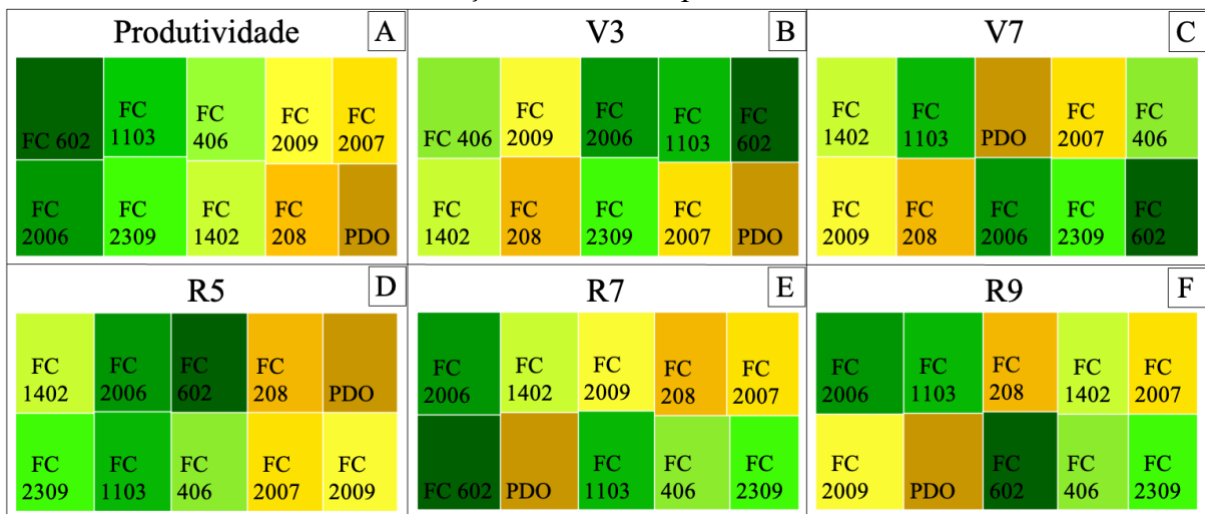
PRO: produtividade; PMS: peso de mil sementes; QGV: quantidade de grãos por vagem; TV: tamanho de vagem; QV: quantidade de vagens; AP: altura de planta; DC: diâmetro de caule. Fonte: Autor

O gráfico em árvore é uma ferramenta visual que fornece uma exibição hierárquica de dados e facilita a localização de padrões. Dessa forma, as Figuras 4, 5 e 6 apresentam os resultados, comparando os padrões de cores das avaliações realizadas durante o ciclo das plantas através de imagens com os padrões dos dados de produtividade.

A Figura 4-A apresenta a produtividade dos genótipos avaliados, onde a cor verde e maior tamanho dos retângulos estão associadas as linhagens com maiores valores absolutos de produtividade, e à medida que os retângulos vão diminuindo de tamanho e adquirindo tons amarelados, menos produtivas são as linhagens. Similarmente as Figuras 4-B, 4-C, 4-D, 4-E e 4-F mostram os resultados de cada linhagem para o parâmetro Hue, ordenados por tamanho, conforme a proporção de pixels verdes presentes em cada período fenológico.

O parâmetro Hue aborda todas as cores presentes na imagem em sua avaliação, e em uma imagem de um campo experimental de plantas é provável que as cores em evidencia sejam tons terrosos, amarelados e esverdeados, devido à combinação do solo e plantas na cena.

Figura 4 – Proporção de cores de cada linhagem através do parâmetro Hue para cada período de avaliação, associada à produtividade.



Fonte: Autor

Ao comparar o padrão de cores do gráfico de produtividade (Figura 4-A) com os gráficos de resultados de análises de imagens de cada estágio fenológico (Figuras 4-B, 4-C, 4-D, 4-E e 4-F), é possível identificar em qual estágio as plantas de feijão-caupi tem o nível de produção de matéria verde correspondente ao nível de produtividade das linhagens.

Observando os padrões de cores fica demonstrado a relação entre as Figuras 4-A e 4-D, em que as cores verdes estão posicionadas a esquerda da imagem e representadas pelos maiores

retângulos. Dessa forma, evidencia-se que, para o parâmetro Hue, o estádio R5 é o que melhor corresponde aos níveis de produtividade para a cultura do feijão-caupi.

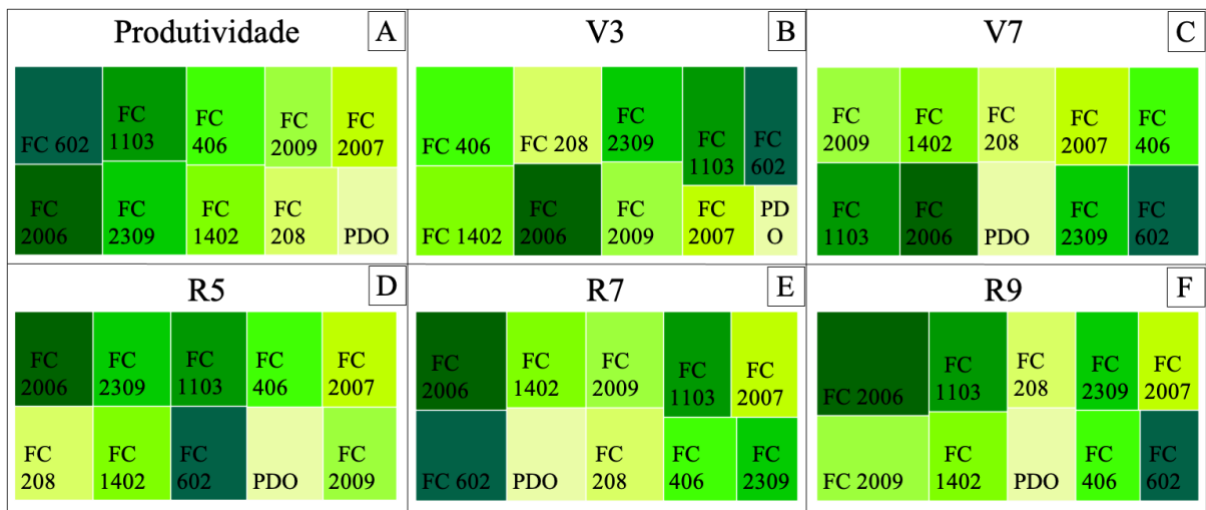
No estádio R5, também conhecido como estádio de floração inicial, as plantas atingem um ponto com alocação máxima de recursos e estão focadas na translocação de nutrientes das folhas e caules para a formação e enchimento das vagens, dessa forma, o esperado é que os genótipos que conseguem produzir mais matéria verde, tenha a sua produção maximizada (SINHA et al., 2021).

Estudos têm comprovado a relação entre a quantidade de clorofila e a produtividade. Em uma pesquisa com milho, observou-se correlação positiva entre clorofila e rendimento nas primeiras avaliações ( $r = 0,259$  às 5 semanas após a semeadura e  $r = 0,363$  às 9 semanas após a semeadura), no entanto, essa relação desaparece e até se torna negativa nos estádios finais de crescimento, quando as plantas entram em senescência (WAHAB et al., 2018).

Respostas similares também foram encontrados em trabalhos que buscavam a melhor fase de desenvolvimento de culturas para avaliação. Utilizando radiômetro portátil e câmera VIS-NIR, Piekarczyk et al. (2011) encontraram forte relação ( $R^2 = 0,87$ ) entre índices de imagens e rendimentos de oleaginosas em floração inicial na Polônia. Swain et al. (2010) demonstraram alta correlação de avaliação de imagens com biomassa e rendimentos de arroz ( $R^2 = 0,76$  e  $0,73$ ), destacando a eficácia de drones para estimar clorofila ( $R^2 = 0,89$ ), nesta mesma fase.

A Figura 5 dispõe os resultados para o parâmetro GA, que quantifica os pixels verdes da imagem em todas as suas tonalidades (ABROUGUI et al., 2022).

Figura 5 – Proporção de níveis de verde de cada linhagem através do parâmetro GA para cada período de avaliação, associada à produtividade.



Fonte: Autor



Através dos padrões de cores e tamanhos apresentados pelo gráfico em árvore, fica evidente a alta compatibilidade dos dados de produtividade (Figura 6-A) em relação a coloração das folhas no período R5 calculados a partir do parâmetro GGA (Figura 6-D).

A coloração verde eficiente das plantas avaliada pelo parâmetro GGA, refere-se a cor verde intensa e saudável nas folhas das plantas, indicando estado nutricional adequado e boa atividade fotossintética. Folhas com tons mais escuros de verde geralmente indicam maior concentração de clorofila, pigmento responsável pela captura de luz solar que atua na conversão dos compostos orgânicos, essenciais para a produção de biomassa e grãos. Por outro lado, a alteração da coloração foliar causado por estresses abióticos ou ataques de pragas e doenças, reduz os processos fotossintéticos causando redução geral do rendimento.

Em todas as avaliações, observou-se que houve alta relação entre a quantidade de pixels verdes das imagens e produção das linhagens, com exceção à linhagem FC 1402, que segundo as análises de imagens é o genótipo que mais produziu massa verde, porém, não alcançou a maior produtividade absoluta entre os genótipos. Isto ocorre porque algumas linhagens podem ser mais eficientes na conversão de nutrientes em biomassa utilizável que outras, dessa forma, linhagens com maior quantidade de massa verde e valor nutricional baixo são menos eficientes na fotossíntese afetando a redistribuição de nutrientes, essenciais para o enchimento de grãos (MARINHO, 2020).

Dentre os estádios fenológicos avaliados, R5 foi o mais adequado para a avaliação de rendimento do feijão-caupi através de imagens RGB, pois permitiu uma análise mais compatível e precisa dos parâmetros avaliados. Resultados semelhantes foram apresentados por Marra (2023), que avaliou o melhor estágio fenológico para coleta de imagens para predição de produtividade da soja. Segundo Bem-Asher et al. (2014), nesta fase se tem melhor visibilidade das características das plantas, como a densidade do dossel e o desenvolvimento dos grãos. Assim, a fase R5 pode ser utilizada para a seleção de linhagens, acelerando a identificação de genótipos promissores no melhoramento de culturas (MIAO et al., 2021)

Os índices de Hue, GA e GGA forneceram resultados satisfatórios, uma vez que revelaram a capacidade em captar diferenças fenotípicas entre as linhagens, mesmo apresentando baixa diferença entre os valores de produtividade, desta forma, as análises de imagens RGB conseguiram ótima performance de diferenciação dos genótipos potencialmente produtivos.

A alta repetibilidade dos índices confirma que o protocolo de imagem aérea é uma ferramenta confiável para futuros estudos em condições similares. O estudo demonstrou que o uso de imagens RGB com drones em R5 é uma maneira eficaz de identificar genótipos de feijão-

caupi promissores, o que pode fortalecer os programas de melhoramento das culturas, abrindo caminho para o desenvolvimento de genótipos adaptados a diversas condições ambientais e contribuindo com a sustentabilidade e segurança alimentar, através da maximização da produtividade.

#### **4 CONCLUSÕES**

- Nas condições do presente trabalho foi possível determinar o melhor período para captura de imagens de um protocolo de fenotipagem utilizando imagens RGB de baixo custo para a cultura do feijão-caupi.

- Sugere-se como período ótimo para captura de imagens a fase R5.

## REFERÊNCIAS

- ABREU JÚNIOR, C. A. M. d.; MARTINS, G. D.; XAVIER, L. C. M.; BRAVO, J. V. M.; MARQUES, D. J.; OLIVEIRA, G. D. Defining the ideal phenological stage for estimating corn yield using multispectral images. **Agronomy**, v. 13, n. 9, p. 2390, 2023.
- ABROUGUI, K.; BOUGHATTAS, N. E. H.; BELHAJ, M.; BUCHAILLOT, M. L.; SEGARRA, J.; DORBOLO, S.; AMAMI, R.; CHEHAIBI, S.; TARCHOUN, N.; KEFAUVER, S. C. Assessing Phytosanitary Application Efficiency of a Boom Sprayer Machine Using RGB Sensor in Grassy Fields. **Sustainability**, v. 14, n. 6, p. 3666, 2022.
- ADIE, M. M.; KRISNAWATI, A.; BALIADI, Y.; YUSNAWAN, E.; WIJANARKO, A. The seed quality of Indonesian cowpea local varieties after storage. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, v. 807, n. 4, p. 042010, 2021.
- ALMEIDA, D. **Manual de Culturas Hortícolas**. Vol. 2. Editorial Presença, 2006. 400 p.
- BASCON, M. V.; NAKATA, T.; SHIBATA, S.; TAKATA, I.; KOBAYASHI, N.; KATO, Y.; INOUE, S.; DOI, K.; MURASE, J.; NISHIUCHI, S. Estimating yield-related traits using UAV-derived multispectral images to improve rice grain yield prediction. **Agriculture**, v. 12, p. 1141, 2022.
- BASTOS, L. M.; CARCIOCHI, W.; LOLLATO, R. P.; JAENISCH, B. R.; REZENDE, C. R.; SCHWALBERT, R.; VARA PRASAD, P. V.; ZHANG, G.; FRITZ, A. K.; FOSTER, C.; WRIGHT, Y.; YOUNG, S.; BRADLEY, P.; CIAMPITTI, I. A. Winter wheat yield response to plant density as a function of yield environment and tillering potential: A review and field studies. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 54, 2020.
- BEN-ASHER, J.; WHITE, D. R.; BROWN, A. D.; WILLIAMS, M. C.; HARRIS, S. J.; SIMON, Y. A. Evaluating the use of UAVs for monitoring crop growth and health. **Precision Agriculture**, v. 15, n. 5, p. 609-620, 2014.
- BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. **Melhoramento de Plantas**. Viçosa: Editora UFV, 2013. 523 p.
- BURBANO-FIGUEROA, O.; MORENO-MORAN, M.; PERTUZ, K. S.; ALMANZA, L. O.; MERCADO, K. M.; MOSQUERA, E.; VERGARA, E.; DEL VALLE RODRIGUEZ, M. Identification of resistance to ramulosis caused by *Colletotrichum gossypii* var. *cephalosporioides* in cotton advanced breeding lines and monitoring of ramulosis disease by RGB-image analysis. In: **4th International Plant Phenotyping Symposium**, 2016.
- DE LA CASA, A.; OVANDRO, G.; BRESSANINI, L.; MARTÍNEZ, J.; DÍAZ, G.; MIRANDA, C. Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 146, p. 531-547, 2018.
- DUBREUIL, V.; FANTE, K. P.; PLANCHON, O.; NETO, J. L. S. A. Les types de climats annuels comme marqueurs du changement climatique au Brésil de 1964 à 2015. **Revista Franco-Brasileira de Geografia**, v. 37, n. 1, p. FC 406-411, 2018.
- FERREIRA, D. F. **Sisvar: sistema de análise estatística**. Versão 5.6. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2014.

FERNANDEZ-GALLEGO, J.; KEFAUVER, S.; VATTER, T.; GUTIÉRREZ, N.; NIETO-TALADRIZ, M.; ARAUS, J. Low-cost assessment of grain yield in durum wheat using RGB images. **European Journal of Agronomy**, v. 105, p. 146-156, abril 2019.

GIANASI, L. **Antracnose do feijoeiro: quantificação de danos e efeito do trifenil acetato de estanho no crescimento do hospedeiro e no progresso da doença**. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1999.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009.

GONÇALVES, J. V. F. **Impacto do uso do drone na agricultura e pecuária: Revisão Bibliográfica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2023. 40 p. Jaboticabal.

HICKEY, L. T. N.; HAFEEZ, A.; ROBINSON, H.; JACKSON, S. A.; LEAL-BERTIOLI, S. C. M.; TESTER, M.; GAO, C.; GODWIN, I. D.; HAYES, B. J.; WULFF, B. B. H. Breeding crops to feed 10 billion. **Nature Biotechnology**, v. 37, p. 744-754, 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais climatológicas do Brasil**. Banco de Dados Meteorológicos do INMET. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/#>. Acesso em: 24 jun. 2024.

MARINHO, T. A. **Fertilizante/corretivos de solo associados ou não com *Bacillus subtilis* como promotor de crescimento do feijão-caupi**. 2020. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Tocantins, Gurupi-TO, 20 f.

MARRA, T. M. **Abordagem para predição de soja por índices de vegetação e modelos de machine learning**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Jaboticabal, 2023. 53 p.

MIAO, Y.; LI, X.; XIE, H.; LIU, J.; ZHANG, S.; YANG, C. High-throughput phenotyping for quantifying crop yield and development using UAVs during the R5 stage. **Agronomy**, v. 11, n. 8, p. 1587, 2021.

MOLES, A. T.; WESTOBY, M. Seed size and shape: reproductive output and strategies for colonization and establishment. **Journal of Ecology**, v. 94, n. 2, p. 315-328, 2006.

OLIVEIRA, L. F. C. de; SARMENTO, P. H. L.; OLIVEIRA, M. G. de C. Cultivo de feijão. **Embrapa – Agência de Informação Tecnológica**. 2023. Disponível em: [https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/fenologia#:~:text=A%20escala%20de%20desenvolvimento%20da,e%20R9%20\(Figura%201\)](https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/fenologia#:~:text=A%20escala%20de%20desenvolvimento%20da,e%20R9%20(Figura%201)). Acesso em: 12 jun. 2023.

PIEKARCZYK, J.; SULEWSKA, H.; SZYMAŃSKA, G. Winter oilseed-rape yield estimates from hyperspectral radiometer measurements. **Quaestiones Geographicae**, v. 30, p. 77–84, 2011.

ROSAS, J. T. F. **Monitoramento da maturação do café usando imagens aéreas multiespectrais**. 2020. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

ROTH, L.; BARENDREGT, C.; BÉTRIX, C. A.; HUND, A.; WALTER, A. High-throughput field phenotyping of soybean: Spotting an ideotype. **Remote Sensing of Environment**, v. 269, p. 112797, 2022.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. ISBN 978-85-7035-800-4.

SHAKOOR, N.; LEE, S.; MOCKLER, T. C. High throughput phenotyping to accelerate crop breeding and monitoring of diseases in the field. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 38, p. 184-192, 2017.

SIE, E. K.; OTENG-FRIMPONG, R.; KASSIM, Y. B.; PUOZAA, D. K.; ADJEBENG-DANQUAH, J.; MASAWUDU, A. R.; OFORI, K.; DANQUAH, A.; CAZENAVE, A. B.; HOISINGTON, D.; RHOADS, J.; BALOTA, M. RGB-image method enables indirect selection for leaf spot resistance and yield estimation in a groundnut breeding program in Western Africa. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 957061, 2022.

SINHA, R.; FRITSCHI, F. B.; ZANDALINAS, S. I.; MITTLER, R. The impact of stress combination on reproductive processes in crops. **Plant Science**, v. 311, p. 111007, 2021.

SILVA, A. C. da; MORAIS, O. M.; SANTOS, J. L.; D'ARÊDE, L. O.; DA SILVA, P. B. Componentes de produção, produtividade e qualidade de sementes de feijão-caupi em Vitória da Conquista, Bahia. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 8, n. 3, p. 327-335, 2014.

SIMONE, M. de; REILLY, J.; MUÑOZ, A.; PÉREZ, R.; MORENO, S. Adaptación de variedades y líneas de judías secas (*Phaseolus vulgaris* L.) a la recolección mecánica directa. **Salta: INTA**, 1992. 5 p.

SONG, Q.; ZHANG, G.; ZHU, X. G. Optimal crop canopy architecture to maximise canopy photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake under elevated CO<sub>2</sub> – a theoretical study using a mechanistic model of canopy photosynthesis. **Functional Plant Biology**, v. 40, n. 2, p. 108-124, 2013.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2004. 416 p.

SWAIN, K. C.; THOMSON, S. J.; JAYASURIYA, H. P. W. Adoption of an unmanned helicopter for low-altitude remote sensing to estimate yield and total biomass of a rice crop. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 53, p. 21–27, 2010.

THE JAMOVI PROJECT. **Jamovi: Statistical software**. Versão 2.0. Sydney: The Jamovi Project, 2021. Disponível em: <https://www.jamovi.org>. Acesso em: 25 jun. 2024.

WAHAB, I.; HALL, O.; JIRSTRÖM, M. Remote sensing of yields: Application of UAV imagery-derived NDVI for estimating maize vigor and yields in complex farming systems in Sub-Saharan Africa. **Drones**, v. 2, p. 28, 2018.

## CAPÍTULO III

### SELEÇÃO DE LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI NO SUL ESTADO DO TOCANTINS ATRAVÉS DE ANÁLISE DE IMAGENS RGB

#### RESUMO

Pesquisas agrícolas recentes destacam a importância dos programas de melhoramento de culturas na redução da pobreza, insegurança alimentar e mudanças climáticas. O feijão-caupi, em particular, destaca-se por sua relevância socioeconômica, especialmente em regiões em desenvolvimento. Objetivou-se com este estudo identificar linhagens de feijão-caupi com alto potencial produtivo, utilizando tecnologia de imagens RGB em um programa de melhoramento genético na região Norte do Brasil. Conduzido nas safras de 2022 e 2023, o experimento utilizou delineamento em blocos casualizados (DBC) com 9 linhagens de feijão-caupi e uma testemunha comercial, em 4 repetições. As imagens foram capturadas por drone equipado com câmera RGB e analisadas com o software Breedpix 2.0. Também foram avaliados o teor de nitrogênio nas folhas, altura das plantas, diâmetro do caule, número e tamanho das vagens, número de grãos por vagem, peso de mil sementes e produtividade. A análise de variância com teste F e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade indicou diferenças significativas para altura de plantas, número de vagens por planta, peso de mil sementes, saturação, e parâmetros  $v^*$  e  $b^*$  analisados por imagens. Os parâmetros Hue e GGA, obtidos por imagens RGB, mostraram forte associação com a produtividade. As linhagens FC 602, FC 2006, FC 1103 e FC 2309 destacaram-se com os melhores desempenhos produtivos para produção no Sul do estado do Tocantins, Norte do Brasil.

**Palavras-chave:** *Vigna unguiculata*, sensoriamento remoto, melhoramento de plantas, produtividade

#### ABSTRACT

Recent agricultural research highlights the importance of crop improvement programs in reducing poverty, food insecurity, and the effects of climate change. Cowpea, in particular, stands out for its socioeconomic relevance, especially in developing regions. This study aimed to identify cowpea lines with high yield potential using RGB imaging technology within a genetic improvement program in Northern Brazil. Conducted during the 2022 and 2023 growing seasons, utilized a randomized block design (RBD) with nine cowpea lines and one commercial control, in four replicates. Images were captured by a drone equipped with an RGB camera and analyzed with Breedpix 2.0 software. Leaf nitrogen content, plant height, stem diameter, number and size of pods, number of grains per pod, thousand-seed weight, and yield were also evaluated. Analysis of variance with an F-test and means comparison by Tukey's test at a 5% probability level indicated significant differences for plant height, number of pods per plant, thousand-seed weight, saturation, and  $v^*$  and  $b^*$  parameters analyzed by images. Hue and GGA parameters obtained from RGB images showed a strong association with yield. The lines FC 602, FC 2006, FC 1103, and FC 2309 stood out with the best productive performance for cultivation in the southern region of Tocantins, Northern Brazil.

**Keywords:** *Vigna unguiculata*, remote sensing, plant breeding, productivity

## 1 INTRODUÇÃO

Pesquisas agrícolas recentes sinalizam a importância que programas de melhoramento de culturas tem na redução da pobreza, insegurança alimentar e vulnerabilidade climática. Esses programas são responsáveis pelo desenvolvimento de novas cultivares de espécies orientados pela demanda da sociedade (OCCELLI et al., 2024).

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata (L.) Walp*) é uma espécie proteica e energética que tem se destacado com grande importância socioeconômica e estratégica, contribuindo na dieta alimentar e renda nos locais em que são cultivados e/ou consumidos (OSIPITAN et al., 2021). Para os pequenos agricultores familiares é uma importante fonte de renda que representa uma parcela significativa da produção agrícola no Brasil. A venda de feijão-caupi no mercado local e regional contribui significativamente para a economia rural (RAMOS et al., 2014).

Nos últimos anos esta cultura vem ganhando espaço no cenário agrícola brasileiro, principalmente onde é cultivado na forma de safrinha por médios e grandes produtores, que empregam a mesma tecnologia utilizada no cultivo da soja, o que contribuiu consideravelmente para que o país se consolidasse como o quarto maior produtor mundial desta leguminosa (FREIRE FILHO, et al., 2011; FAO, 2024; CONAB, 2024).

Embora seja uma espécie de fácil adaptação às diferentes condições edafoclimáticas, as produtividades dessa cultura são relativamente baixas. Segundo a FAO, a produtividade média mundial foi de cerca de 643,5 kg.ha<sup>-1</sup> em 2022, enquanto a CONAB aponta média brasileira de 491 kg.ha<sup>-1</sup> para o mesmo período. Atualmente a região com maior produtividade é o Centro-Oeste (1.146 kg.ha<sup>-1</sup>), enquanto as regiões Norte e Nordeste que juntas somam mais de 80% da produção nacional possuem médias de produtividade de 989 kg.ha<sup>-1</sup> e 449 kg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente. O Tocantins é o segundo maior produtor da região Norte, com média produtiva de 1.116 kg.ha<sup>-1</sup> (FAO, 2024; CONAB, 2024).

Esses dados indicam que as principais regiões produtoras de feijão-caupi no Brasil estão concentradas em estados que, apesar de estarem nas regiões mais pobres do país, têm papel significativo na produção agrícola. O aumento de produção de grãos nessas áreas pode ter impacto positivo na qualidade de vida da população local. Dados do IBGE e CONAB demonstram que tanto a produção agrícola quanto o IDH aumentaram significativamente ao longo do tempo, indicando correlação positiva entre o crescimento da agricultura e a melhoria no desenvolvimento humano, o que pode estar associado a melhorias na infraestrutura, tecnologia agrícola e políticas de apoio ao setor (RIBEIRO e DANTAS, 2016; ANDRADE e RAIHER, 2023; CONAB, 2024; PNUD, 2024)

O aumento do potencial produtivo através do melhoramento genético de plantas, possibilita o desenvolvimento de cultivares com constituição genética de maior potencial, por meio da redução dos danos causados por estresses abióticos, sem ocasionar expansão agrícola da área, tornando-a eficaz tanto economicamente como ambientalmente (MENEZES et. al., 2021).

Um dos principais problemas para o lançamento de novas cultivares no Brasil é o desenvolvimento de genótipos que atendam as particularidades de cada zona produtiva. O fato do Brasil ser um país com grande área territorial e heterogeneidade climática dentro de suas regiões, torna-se mais complexo ainda o desenvolvimento de cultivares adaptadas a particularidades edafoclimáticas de cada estado. Uma alternativa é o desenvolvimento de cultivares nas regiões em que serão cultivadas, visando desenvolver cultivares direcionadas a minimização da sensibilidade aos estresses abióticos e ao aumento do potencial produtivo (ROCHA, 2022).

Além disso, o lançamento de novas cultivares é um processo demorado, pois envolve cruzamentos seletivos, seleção e testes de várias gerações de plantas e isto pode levar anos, sendo que os métodos de identificação de linhagens com características superiores têm influência direta na velocidade e qualidade em que esses fenótipos serão selecionados e disponibilizados para o agricultor. Segundo Zhou et al. (2022), traços agronômicos secundários, identificados por fenotipagem de alto rendimento, podem ser usados na seleção de linhagens superiores, e, embora esses traços não estejam diretamente relacionados ao rendimento final, são indicativas de outras qualidades agronômicas importantes e podem ser medidas em estágios mais precoces do desenvolvimento da planta. Isso significa que, ao usar esses traços secundários, é possível selecionar as melhores linhagens antes que as plantas atinjam o estágio final de crescimento, o que economiza tempo e recursos ao reduzir o número de plantas que precisam ser testadas em campo.

A adoção de tecnologias de sensoriamento remoto, como a fenotipagem de plantas através de imagens é uma técnica moderna que tem o potencial de superar as deficiências da fenotipagem tradicional (SOUSA, 2014). Essa abordagem utiliza metodologias avançadas de imagem para avaliar características fenotípicas de maneira precisa e eficiente. Ademais, essa tecnologia facilita o acompanhamento do desenvolvimento das plantas ao longo do tempo, possibilitando intervenções rápidas quando necessário, resultando na otimização do uso de recursos como água e insumos agrícolas (CHAPU et al., 2024).

O uso de imagens RGB na agricultura, pode ser considerada uma tecnologia relativamente de baixo custo, que fornecem informações de qualidade de maneira eficiente

(ARAUS e KEFAUVER, 2018). Trata-se de um método que utiliza câmeras digitais para capturar imagens das plantas em diferentes estádios de crescimento. Essas imagens são processadas através de softwares específicos para extrair características como área foliar, altura da planta, cor das folhas e dados fisiológicos e/ou bioquímicos relacionadas aos traços fenotípicos das plantas. Os resultados dependerão basicamente da confiabilidade dos algoritmos implementados (ARAUS e KEFAUVER, 2018), auxiliando na seleção de linhagens com características desejáveis, como maior produtividade e resistência a doenças.

Índices de espaço de cores RGB e índices de vegetação são fortemente associados, e, portanto, podem ser utilizados para seleção de linhagens a partir de imagens do dossel (CASTRO-VALDECANTOS et al., 2022). Diante do exposto, objetivou-se com este estudo identificar linhagens de feijão-caupi desenvolvidas no Sul do estado do Tocantins, com elevado potencial produtivo a partir da utilização de imagens RGB como ferramenta de seleção.

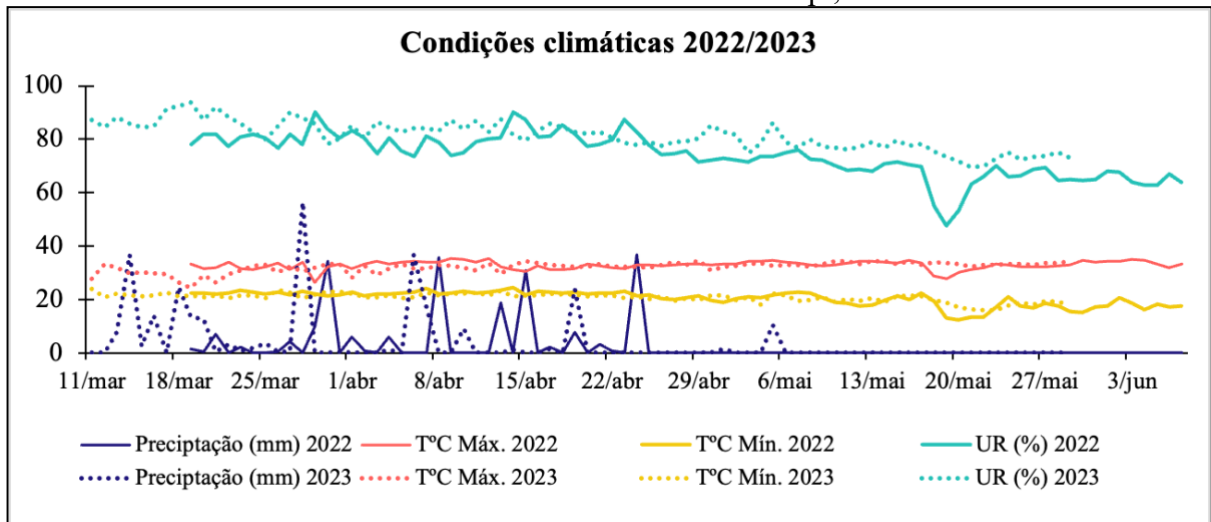
## 2 METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados durante os anos agrícolas 2022 e 2023 na estação de pesquisas agrícolas da Universidade Federal do Tocantins, situada no município de Gurupi, região Norte do Brasil, a uma altitude de 280 metros. O clima da região é caracterizado como tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno (BATISTA et al., 2020). A precipitação média anual é de 1.408 mm, e a temperatura média anual é de 27°C (INMET, 2024).

Essas condições climáticas com períodos alternados de seca e chuvas intensas, são representativas dos desafios enfrentados pelos produtores de feijão-caupi em diversas partes do mundo, assegurando a relevância dos resultados para regiões com condições climáticas similares a nível global.

A Figura a seguir apresenta uma visão detalhada das condições climáticas enfrentadas pelas linhagens de feijão-caupi durante os experimentos, permitindo uma análise mais precisa dos resultados obtidos. Em períodos de estiagem, utilizou-se irrigação suplementar por aspersão.

Figura 1 – Dados climatológicos diários (precipitação, temperaturas máximas, temperaturas mínimas e umidade relativa do ar) durante os períodos de 19 de março de 2022 a 7 de junho de 2022 e 11 de março de 2023 a 29 de maio de 2023 na estação experimental da Universidade Federal do Tocantins em Gurupi, Tocantins.



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2024).

Foram utilizadas 9 linhagens de feijão-caupi e uma variedade comercial (Pingo de Ouro), fornecidas pelo banco de germoplasma da empresa Cerrado's Seeds Ltda, originadas de cruzamento dialélico de 9 genitores femininos e 4 masculinos, gerando 36 populações segregantes, conduzidas pelo método da população (método Bulk), sob condições

edafoclimáticas do Cerrado tocantinense. Após atingirem alto nível de homozigose, houve seleção das plantas que apresentavam melhor adaptação as condições locais e realizado testes de progênie, afim de obter genótipos promissores para a região.

O experimento foi disposto em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições. Cada parcela era constituída de 9 m<sup>2</sup> (1,8 x 5 metros), divididas em quatro linhas de semeadura de 5 metros e espaçamento de 0,5 metros entre elas, sendo 10 plantas por metro. Durante a avaliação, considerou-se como área útil as duas linhas centrais de cada parcela, desprezando-se 0,5 metros das extremidades de cada linha, afim de reduzir o efeito bordadura.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho – Amarelo distrófico de textura média (SANTOS, 2018). Amostras de solo foram coletadas na camada superficial de 0-20 cm para análises físico-químicas. A análise granulométrica revelou uma composição de 66,2% de areia, 3,8% de silte e 30% de argila, enquanto os resultados das análises químicas mostram um pH (em CaCl<sub>2</sub>) de 5,5, teor de matéria orgânica (M.O.) de 1,5 dag.kg<sup>-1</sup>, acidez potencial (H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>) de 1,5 cmolc.dm<sup>-3</sup> e saturação por bases de 64%. Quanto aos nutrientes disponíveis, foram encontrados 10,0 mg.dm<sup>-3</sup> de fósforo (P) (Mehlich 1), 78,0 mg.dm<sup>-3</sup> de potássio (K), 1,8 cmolc.dm<sup>-3</sup> de cálcio (Ca), 0,7 cmolc.dm<sup>-3</sup> de magnésio (Mg), 0,0 cmolc.dm<sup>-3</sup> de alumínio (Al<sup>3+</sup>), e 13 g.kg<sup>-1</sup> de ferro (Fe).

Os resultados indicaram a necessidade de suplementação para atender às exigências da cultura, sendo realizada adubação de base e cobertura segundo Sousa e Lobato (2004). Na adubação de base, aplicou-se 200 kg.ha<sup>-1</sup> de formulado NPK (04:30:10) incorporados à linha de semeadura no dia do plantio. A adubação de cobertura foi realizada 25 dias após semeadura com K<sub>2</sub>O (50 Kg.ha<sup>-1</sup>) e N (20 Kg.ha<sup>-1</sup>), afim de suprir as necessidades nutricionais durante o ciclo da cultura. O preparo do solo realizado de forma convencional, com quatro operações de gradagem do solo.

As sementes foram submetidas a tratamento com fungicida (Benzimidazol e Fenilpiridinilamina) na dosagem de 180 mL de produto comercial por quilograma de sementes e inseticida (Pirazol e Neonicotinóide) na dosagem de 350 mL de produto comercial por quilograma de sementes para prevenir doenças e pragas iniciais. O controle de ervas daninhas foi realizado por métodos manuais e com o uso de herbicidas do grupo Sulfonilureia (40g.ha<sup>-1</sup> de produto comercial) e Oxima ciclohexanodiona (450 ml.ha<sup>-1</sup> de produto comercial). Além disso, foram realizadas inspeções regulares para monitorar pragas e doenças, aplicando inseticidas dos grupos químicos Clorantraniliprole (100 ml.ha<sup>-1</sup> de produto comercial) e Neonicotinoide-Piretróide (125 ml.ha<sup>-1</sup> produto comercial) quando necessário.

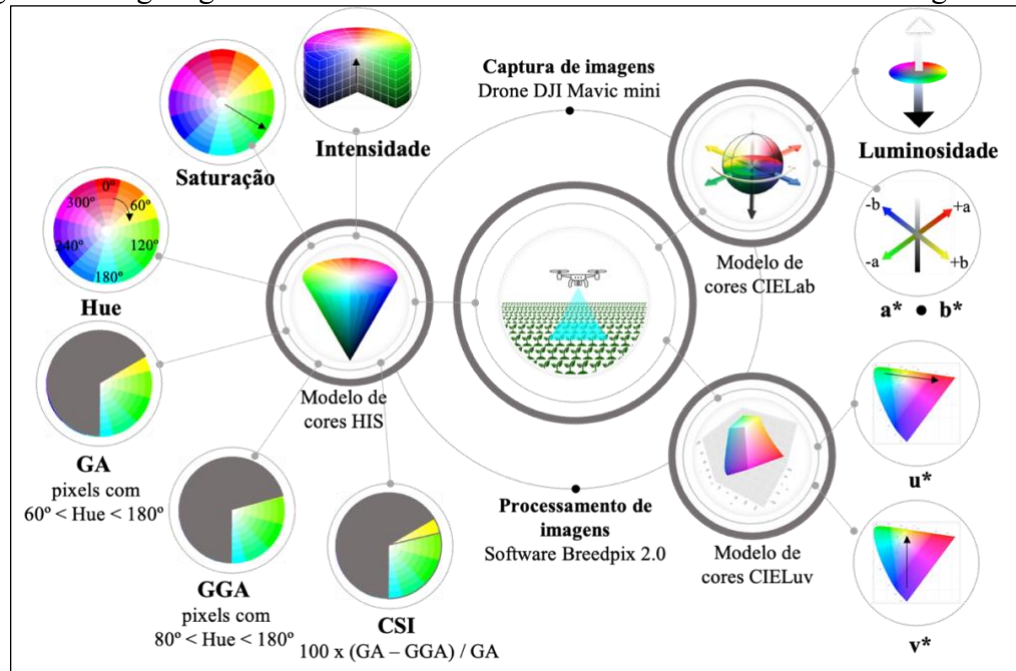
A fenotipagem por meio de técnicas tradicionais foram realizadas na fase R8 e R9 com medições de 10 plantas de cada parcela, escolhidas de forma aleatória, com as seguintes avaliações: altura de plantas – AP (medição com fita métrica desde a base até o ponto mais alto da planta); diâmetro do caule – DC (medido 2 cm acima do solo com auxílio de um paquímetro); tamanho de vagens – TV (comprimento do pedúnculo até a extremidade oposta utilizando uma régua); número de vagens por planta – NV (contagem manual); número de grãos por vagem – NG (contagem manual); peso de mil sementes – PMS (contagem e pesagem de 8 repetições de 100 sementes e posterior multiplicação do resultado por 10, com peso registrado em gramas) e; produtividade – PRO (obtido por meio da massa de grãos da área útil em quilogramas, com correção para 13% de umidade, transformando-os para  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).

Para avaliar o teor de nitrogênio (N) nas folhas, foi empregado o método de Kjeldahl (GOYAL et al., 2022), que consiste na coleta dos terceiros trifólios do ápice de plantas representativas de cada genótipo. No laboratório, as folhas são lavadas, secas em estufa a  $65^{\circ}\text{C}$  até atingirem peso constante e moídas até obter um pó fino e homogêneo. Aproximadamente 0,2 g de cada amostra é submetida à digestão com 5 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado em cada tubo, levados ao bloco digestor até a solução clarear. As soluções digeridas foram destiladas, adicionando-se 50 mL de NaOH 10 mol/L para liberar amônia, que foram colocadas em frascos com 25 mL de ácido bórico a 4% e indicador vermelho de metila. A titulação ocorreu quando a solução ficou verde, adicionando-se HCl 0,1 mol/L até a mudança de cor para vermelho. Registrou-se o volume de HCl utilizado para cada amostra. Para calcular o teor de nitrogênio, utilizou-se a fórmula “ $\text{N}(\%) = ((V - V_0) \times N \times 1,4) \times P^{-1}$ ”, onde V é o volume de HCl utilizado na titulação da amostra,  $V_0$  é o volume de HCl utilizado na titulação do branco, N é a normalidade do HCl (0,1 mol/L), 1,4007 é o fator de conversão para gramas de nitrogênio e P é o peso da amostra em gramas.

As avaliações de imagens foram realizadas com imagens obtidas aos 45 dias após semeadura (DAS), através de um drone modelo Dji Mavic mini equipado com câmera RGB com sensor CMOS de 1 /2.3 polegadas, com resolução de 12 megapixels, formando um ângulo de  $90^{\circ}$  entre o obturador da câmera e a parcela fotografada.

As imagens foram analisadas utilizando software de código aberto Breedpix 2.0, adaptado para Java8, com o plug-in CIMMYT Maize Scanner, integrado ao pacote de processamento de imagens Fiji-2. A análise foi baseada nos modelos de cores HIS (Hue, intensidade e saturação), Cie-Luv e Cie-Lab (Figura 2). Este software permite a extração automática de características quantitativas das imagens, como a quantificação e nível de cores, permitindo a comparação precisa e eficiente entre diferentes tratamentos.

Figura 2 – Organograma com modelos de cores utilizadas na análise de imagem RGB.



Utilização do espaço de cores HIS com metodologia descrita por ZAMAN-ALLAH et al., 2015; Utilização do espaço de cores CieLab e CieLuv com metodologia descrita por Casadesús et al., 2007. Fonte: Autor

Os parâmetros avaliados através do modelo de cores HIS são: Intensidade (valores baixos associados a tons escuros e valores altos a tons mais claros); Saturação (valores altos associados a cores intensas e vivas, enquanto cores com baixa saturação aparecem mais cinzentas, associado a valores mais baixos); Hue (representa a cor predominante na imagem, no espectro do cores de um ângulo de 360° do espaço de cores HIS); GA (Refere-se à área verde na imagem, utilizada para medir a quantidade de cobertura vegetal – ângulos compreendidos entre 60° e 180°); GGA (Refere-se à área de verde mais intenso ou puro na imagem, compreendendo os pixels entre 80° e 180°); CSI ( índice de senescência de colheita – calculado através da fórmula “ $CSI = 100 \cdot \{(GA - GGA) \cdot GA^{-1}\}$ ”); a\* (Coordenada no espaço de cor CIELab que indica a posição da cor entre verde, com valores negativos, e vermelho, com valores positivos); b\* (Coordenada no espaço de cor CIELab que indica a posição da cor entre azul com valores negativos, e amarelo com valores positivos); u\* (Coordenada no espaço de cor CIELuv com tom verde associado a valores mais baixos, e tom vermelho a valores mais altos, na cor da imagem); v\* (Coordenada no espaço de cor CIELuv com tom azul associado a valores mais baixos, e tom amarelo a valores mais altos, na cor da imagem) (GRACIA-ROMERO et al., 2018).

Como a pesquisa foi realizada durante dois anos agrícolas seguidos, primeiro realizou-se análise isolada de cada ano, depois, usando a análise dos quadrados médios do erro, conforme

a metodologia de Gomes (2009), verificou-se que o ambiente experimental era homogêneo. Com isso, realizou-se análise conjunta dos dados dos dois anos.

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando o programa estatístico Sisvar (FERREIRA, 2014), com comparação das médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância, indicou diferença para altura de plantas, número de vagens por planta, peso de mil sementes, saturação, e para os parâmetros  $v^*$  e  $b^*$  analisados através de imagens (Tabela 1).

Tabela 1 – Análise de variância e comparação de médias de linhagens de feijão-caupi avaliadas por meio de técnicas tradicionais e análise de imagens.

FV	GL <sub>TOTAL</sub>	QM <sub>ERRO</sub>	F	P	CV (%)
Altura de plantas	79	54,341	3,560	0,001*	11,56
Diâmetro do caule	79	0,723	2,015	0,541	8,81
Tamanho de vagem	79	5,084	2,129	0,041	12,20
Número de vagens	79	5,614	5,470	0,000*	27,18
Número de grãos por vagem	79	3,520	2,198	0,035	15,00
Peso de mil sementes	79	446,617	4,131	0,000*	12,79
Produtividade	79	156899,839	1,791	0,090	29,00
Teor de nitrogênio (N)	79	0,349	1,183	0,323	24,46
Hue	79	13,866	1,599	0,137	4,46
Saturação	79	0,001	2,363	0,024*	11,39
v	79	7,355	2,601	0,013*	5,45
GA	79	0,002	1,283	0,266	4,71
GGA	79	0,016	1,665	0,119	18,16
Intensidade	79	0,000	1,785	0,091	4,78
Luminosidade	79	3,970	2,070	0,047	3,48
u	79	8,039	0,900	0,531	17,13
a	79	4,973	0,922	0,513	9,04
b	79	8,476	2,753	0,009*	6,76
Índice de senescência	79	143,858	1,655	0,121	44,97

\*: Significativo estatisticamente pelo teste Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

FV: fonte de variação; GL: grau de liberdade; QM<sub>ERRO</sub>: quadrado médio do erro; F: razão de duas variâncias; P: probabilidade de significância; CV: coeficiente de variação. Fonte: Autor

As avaliações realizadas durante o estudo apresentam coeficiente de variação CV (%) dentro de limites aceitáveis para análises agrícolas em campo. Os coeficientes apresentaram valor abaixo de 30%, com exceção do caractere índice de senescência, avaliado por meio de análise de imagens. Este parâmetro é calculado a partir da quantidade da cor amarela e tons verdes amarelados das plantas, sendo que as colorações das folhas podem variar naturalmente entre diferentes plantas ou mesmo dentro da mesma planta, devido principalmente a idade das folhas e ou estresses.

A análise estatística dos dados revelou variações significativas entre os resultados. As letras de significância estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise de variância e compara o de médias de linhagens de feijão-caupi avaliadas por meio de técnicas tradicionais e análise de imagens.

FV	FC 208	FC 406	FC 602	FC 1103	FC 1402	FC 2006	FC 2007	FC 2009	FC 2309	PDO
Altura de plantas*	64,02ab	62,56ab	58,11b	67,48ab	73,51a	59,52b	68,77ab	58,49b	61,70ab	63,48ab
Diâmetro do caule	9,65a	9,42a	10,42a	9,60a	9,79a	10,21a	9,83a	9,16a	9,25a	9,18a
Tamanho de vagem	20,20a	17,08a	18,45a	16,95a	20,28a	19,12a	18,80a	17,48a	18,04a	18,35a
Número de vagens*	8,40bc	9,12bc	13,23a	7,81bc	7,86bc	8,52bc	10,70ab	7,71bc	7,52bc	6,28c
Número de grãos por vagem	12,22a	11,40a	13,80a	12,26a	13,35a	11,21a	12,48a	14,07a	11,60a	12,67a
Peso de mil sementes*	177,62ab	154,44bc	140,90c	192,78a	168,96abc	157,12bc	151,71bc	159,79abc	175,15abc	173,24abc
Produtividade	1213,51a	1465,88	1619,29a	1497,30a	1345,03a	1513,76a	1251,16a	1271,27	1492,66a	990,53a
Teor de nitrogênio (N)	2,65a	2,47a	2,34a	2,50a	2,34a	2,36a	2,39a	1,87a	2,53a	2,68a
HUE	83,01a	83,23a	83,76a	84,19a	86,64a	84,20a	81,84a	80,82a	84,70a	81,95a
Saturação*	0,43a	0,38ab	0,35b	0,39ab	0,38ab	0,36b	0,40ab	0,40ab	0,36b	0,39ab
v*	52,37a	48,69ab	48,62ab	49,33ab	49,26ab	48,85ab	50,80ab	52,04ab	47,68b	50,42ab
GA	0,97a	0,95a	0,95a	0,95a	0,96a	0,98a	0,94a	0,92a	0,97a	0,94a
GGA	0,67a	0,72a	0,74a	0,72a	0,79a	0,74a	0,65a	0,61a	0,74a	0,63a
Intensidade	0,42a	0,42a	0,44a	0,42a	0,42a	0,44a	0,43a	0,44a	0,42a	0,43a
Luminosidade	57,38a	55,98a	57,68a	56,06a	56,56a	57,59a	57,74a	59,21a	56,12a	57,58a
u	-17,73a	-16,05a	-16,08a	-17,12a	-18,50a	-16,47a	-15,87a	-15,69a	-16,36a	-15,60a
a	-26,07a	-24,17a	-23,99a	-25,01a	-25,93a	-24,35a	-24,38a	-24,50a	-24,09a	-24,20a
b*	46,11a	42,27ab	41,34ab	42,80ab	42,34ab	41,67ab	44,13ab	45,10ab	40,82ab	43,78ab
Índice de senescência	30,95	25,20a	22,16a	24,20a	18,01a	23,99a	31,39a	34,06a	23,08a	33,67a

\*: Significativo estatisticamente pelo teste F ( $p \leq 0,05$ ). Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

FV: fonte de variação; PDO: Genótipo Pingo de Ouro. Fonte: Autor

A altura de plantas é uma característica importante e pode influenciar diversos aspectos do cultivo e da produtividade, sendo que a altura ideal pode variar dependendo das condições climáticas, tipo de solo, sistema de cultivo, práticas de manejo, entre outros. A linhagem FC 1402 diferiu das linhagens que apresentaram maior valor de altura. Geralmente a altura de plantas de feijão-caupi variam de 30 cm a 90 cm, sendo que, para facilitar a mecanização, especialmente a colheita, o ideal é que as plantas não cresçam mais que 55 cm (SIMONE et al., 1992). Por outro lado, na agricultura familiar, optar por genótipos mais altos pode trazer benefícios significativos, como conforto na colheita manual, reduzindo a necessidade de se curvar excessivamente (OLIVEIRA, 2016).

A produtividade é o resultado da relação que existe entre os componentes de produção, sendo que o número de vagens por planta e a massa de grãos exercem grande influência sobre este resultado (TEIXEIRA et al., 2007). O número de vagens por planta (NV) foi inversamente proporcional ao peso de mil sementes (PMS), ou seja, as linhagens FC 602, FC 2007, FC 406 e FC 2006 foram, nesta ordem, os genótipos com maiores índices de NV, pois foram as únicas a diferirem dos fenótipos que apresentaram menores médias, enquanto para o parâmetro de PMS apresentaram os piores desempenhos. Esta relação é um reflexo de como as plantas alocam os fotoassimilados, então alguns genótipos translocam seus recursos para a formação de vagens, enquanto outras priorizam o enchimento de grãos, dessa forma, plantas que produzem maior quantidade de vagens tendem a ter sementes menores, enquanto plantas com menor quantidade de vagens produzem sementes maiores (SILVA et al., 2014).

Os pesos das sementes também podem ser afetados por características relacionadas à posição da vagem na planta, data de floração, número de vagens e quantidade de sementes por vagem (RAMBO et al., 2002). Acredita-se que este tipo de variação esteja ligado a relação fonte-dreno das plantas, em acessos com períodos de floração mais longo são produzidas sementes de tamanho maiores devido a maior disponibilidade de carbono assimilado das folhas que mantêm a coloração verde, enquanto acessos com período de floração menores, produzem sementes menores, devido a baixa disponibilidade de carbono durante a fase de enchimentos de grãos causados pela rápida senescência (ISEKI et al., 2019).

Todas as linhagens avaliadas apresentaram produtividade média superior às médias de produtividade nacional ( $491 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e mundial ( $643,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) (FAO, 2024; CONAB, 2024). A análise de produtividade mostrou que não houve diferenças entre as populações ( $p > 0,05$ ). Isso sugere que, na 8ª geração, as linhagens se tornaram uniformes em termos de produtividade, provavelmente por causa da seleção feita nas gerações anteriores (RAPP e WENDEL, 2005).

No entanto, ao observar os valores absolutos de produtividade, foram identificadas variações que podem ser relevantes ao considerar outros fatores.

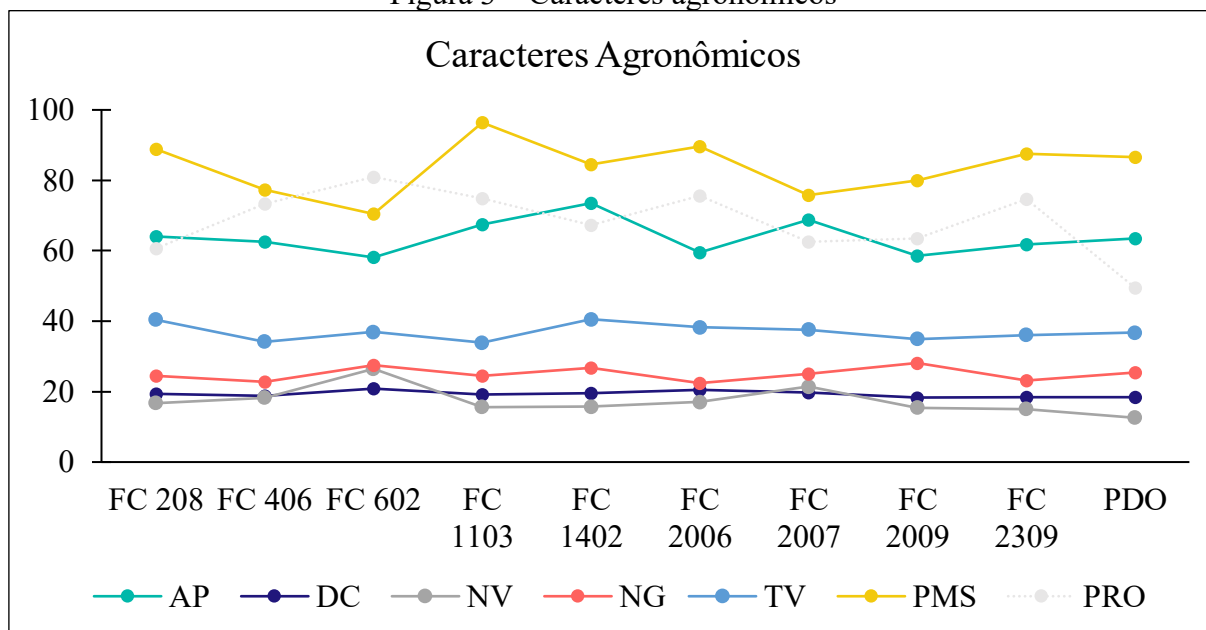
Os valores médios de produtividade variaram entre 990,53 e 1619,29 kg.ha<sup>-1</sup>, apontando uma diferença de até 10 sacas por hectare entre os genótipos, o que pode representar uma variação substancial na receita do produtor. Na cotação atual (junho de 2024), o preço médio de uma saca de 60 kg no Brasil foi de R\$ 247,49 (AGROLINK, 2024), dessa forma, a variação de 10 sacas por hectare se traduz em uma diferença de R\$ 2.474,90 por hectare. Segundo Ferreira (2023), o custo de produção de feijão-caupi sequeiro é em torno de R\$1.500,00 por hectare, dessa forma, evidencia-se a influência desta variação na lucratividade. Além disso, maior produtividade pode ajudar a reduzir a escassez de alimentos, contribuindo para uma maior estabilidade nos preços e acesso a alimentos para a população.

Os genótipos mais produtivos foram FC 602 (1619,29 kg.ha<sup>-1</sup>), FC 2006 (1513,76 kg.ha<sup>-1</sup>), FC 1103 (1497,30 kg.ha<sup>-1</sup>) e FC 2309 (1492,66 kg.ha<sup>-1</sup>), enquanto a cultivar comercial Pingo de Ouro (990,53 kg.ha<sup>-1</sup>) teve o pior desempenho, seguida das linhagens FC 208 (1213,51 kg.ha<sup>-1</sup>), FC 2007 (1251,16 kg.ha<sup>-1</sup>) e FC 2009 (1271,27 kg.ha<sup>-1</sup>).

A avaliação de teor foliar de nitrogênio não apresentou diferença significativa entre os tratamentos. Como cultura fixadora de nitrogênio, descobriu-se que a aplicação de N ao feijão não faz diferença significativa no rendimento final da cultura, aliás, sabe-se que a aplicação de fertilizante nitrogenado nas leguminosas diminui nodulação e taxa de fixação de nitrogênio (MCEWEN, 1981).

A avaliação de caracteres agronômicos é uma das principais formas de avaliação de plantas em programas de melhoramento genético, tais como rendimento, resistência a pragas e doenças, tolerância a estresses ambientais, qualidade nutricional, entre outros. Na Figura 3 é possível comparar alguns caracteres agronômicos das linhagens avaliadas.

Figura 3 – Caracteres agronômicos



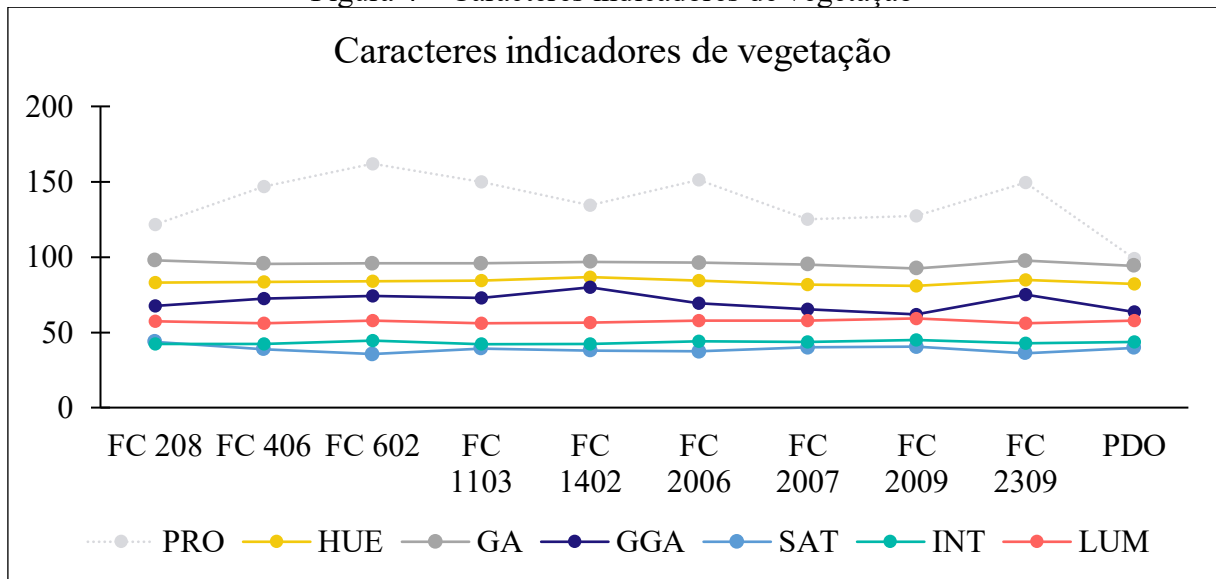
AP: altura de plantas; DC: diâmetro do caule; NV: número de vagens por planta; NG: número de grãos por vagem; TV: tamanho médio de vagens; PMS: peso de mil sementes; PRO: produtividade. Fonte: Autor

A produtividade é um reflexo da interação entre vários componentes de produção (TEIXEIRA et al., 2007). Esses componentes incluem a altura da planta, diâmetro do caule, número de vagens, número de grãos, tamanho das vagens e massa de grãos. Cada um desses fatores contribui de maneira única e interdependente para o rendimento final da cultura. No entanto, é importante entender que a produtividade não é determinada isoladamente por qualquer um desses componentes, mas sim pela combinação entre todos eles. As linhas da Figura 3 demonstraram que a produtividade, de fato, não segue o mesmo padrão das outras características avaliadas, evidenciando que a produtividade não é determinada de forma isolada por nenhum dos componentes analisados, mas sim pela interação complexa entre todos eles.

A altura da planta pode afetar a capacidade de absorção de luz e a eficiência da fotossíntese, mas plantas muito altas podem acamar e perder rendimento (TAIZ e ZEIGER, 2017). O diâmetro do caule influencia a robustez da planta e sua capacidade de suportar o peso das vagens e grãos (ZHAO et al., 2017). Embora mais vagens possam significar mais pontos de produção de grãos, a produtividade não necessariamente aumenta se o número de grãos por vagem ou o tamanho dos grãos for pequeno (SINCLAIR e JAMIESON, 2006). O número de grãos é importante, mas a massa e a qualidade dos grãos também são cruciais para a produtividade total, pois o tamanho das vagens e a massa dos grãos indicam o potencial de rendimento, mas dependem da saúde geral da planta e das condições de cultivo (TAIZ e ZEIGER, 2017).

A avaliação de imagens RGB de plantas utilizando o software BreedPix permite uma análise detalhada e precisa da saúde e desenvolvimento das plantas, facilitando a análise de características agrônômicas precocemente, através da associação de cores à produtividade (CAVALCANTE et al., 2022). A Figura 4 apresenta os parâmetros Hue, GA, GGA, saturação (SAT), intensidade (INT) e luminosidade (LUM), que são caracteres que expressam a quantidade de pixels verdes nas imagens e que podem ser associados a dados de produtividade.

Figura 4 – Caracteres indicadores de vegetação



PRO: produtividade; HUE: matiz; SAT: saturação; V: valor; GA: área verde; GGA: área mais verde. Fonte: Autor

A linha de produtividade (PRO) tem variações ao longo das diferentes linhagens, sendo que as linhas dos parâmetros Hue e GGA apresentam um padrão similar (Figura 4), exceto para a linhagem FC 1402. Essa correlação sugere que o índice de pixels verdes desses fatores está associado às respostas da produtividade, e é um bom indicador de produtividade para linhagens de feijão-caupi. Por outro lado, o parâmetro de saturação (SAT) apresentou comportamento inversamente proporcional à produtividade.

A saturação mais baixa pode estar relacionada a presença de folhas novas, que tendem a ter uma coloração verde mais clara e menos saturada em comparação à folhas mais velhas, que normalmente são mais escuras. Folhas novas são indicadoras de um crescimento vigoroso, o que está fortemente associado a produtividade (ZAMAN-ALLAH et al., 2015).

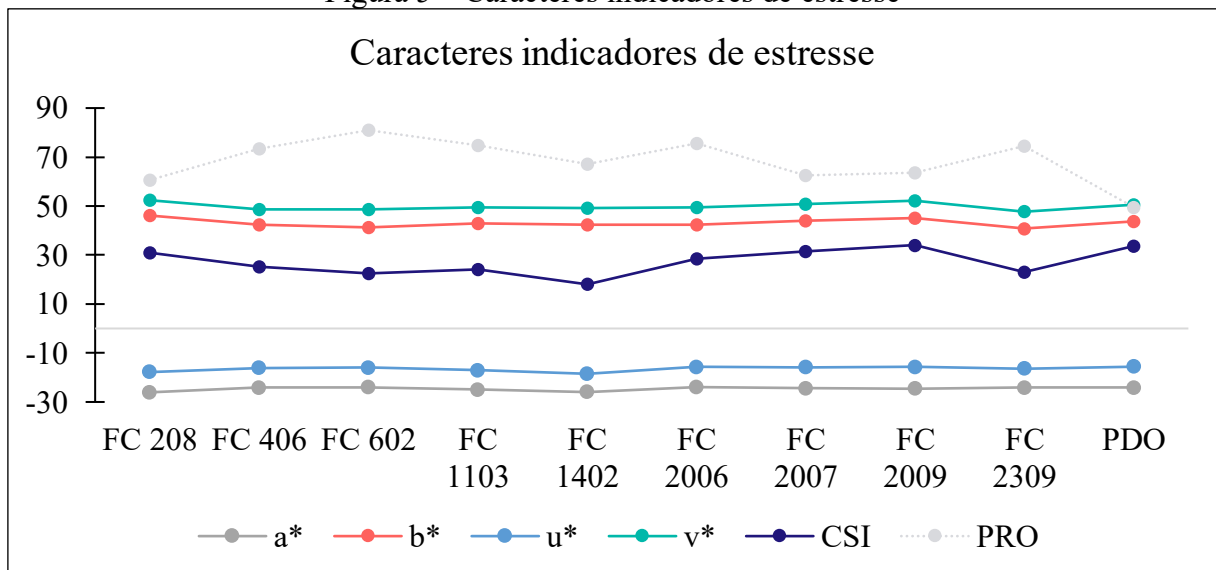
O parâmetro GA também apresentou tendência similar a produtividade (Figura 4), com exceção das linhagens FC 208 e FC 1402. A linhagem FC 208, que apresentou o segundo pior desempenho em produtividade, está associada a um alto valor de GA e baixos valores de GGA e Hue. Isso indica a presença de pigmentação verde amarelada nas folhas deste genótipo, pois

esses tons são contabilizados apenas neste parâmetro, enquanto o Hue calcula a cor predominante da imagem e GGA apenas a cor verde eficiente. Os resultados corroboram com Buchaillet et al. (2018) em afirmar que os índices RGB Hue, GGA e GA calculados a partir de imagens demonstraram as melhores correlações com produtividade de grãos, superando outros índices RGB.

O software Breedpix utiliza a luminosidade e a intensidade para analisar a cor das folhas nas imagens, avaliando tanto os tons claros quanto os escuros. Essa análise ajuda a determinar a saúde, vigor e estágio de crescimento das folhas (PEREIRA et al., 2020). Neste estudo, estes parâmetros não apresentaram nenhuma relação relevante. Corroborando com Buchaillet et al. (2018) que avaliando o desempenho de variedades de milho, as variáveis intensidade de luz e brilho foram insignificantes quanto a quantidade de grãos produzidos.

A análise de imagens RGB também pode ser uma ferramenta eficaz para indicar estresse nas plantas (Figura 5), através da identificação de pigmentações anormais, como o aumento de tons amarelos e vermelhos, resultando na diminuição de pixels verdes na imagem.

Figura 5 – Caracteres indicadores de estresse



Fonte: Autor

Os parâmetros  $a^*$  e  $u^*$ , mede a posição da cor entre verde e vermelho, ambos são utilizados para avaliar a cobertura do solo pelas plantas. Valores menores ou negativos são associados a cor verde e os valores mais altos a cor vermelha (POINTER, 2009).

O caractere  $a^*$ , apresentou menores valores para as linhagens FC 1402, FC 1103, FC 208 e FC 2007. Embora essas linhagens não sejam as mais produtivas, foram as que apresentaram maiores alturas de plantas. É possível que essas plantas também apresentassem

uma copa mais larga, mas isso não se refletiu na produtividade. O fator  $u^*$  também não apresentou comportamento linear compatível com a linha de produtividade, embora tenha apresentado maior valor para o genótipo de pior desempenho (Pingo de Ouro) e menor valor para o genótipo mais alto (FC 1402).

Os fatores  $b^*$  e  $v^*$  têm valores mais amarelados relacionados a valores mais altos (BUCHAILLOT, 2019) o que os tornam particularmente importantes para avaliar características representadas pelo tom amarelo, e juntos com o CSI podem estar associadas a fatores que contribuem com a queda de produtividade como deficiência nutricional, estresse hídrico, ataque de pragas e doenças, senescência, entre outros (ABROUGUI et al., 2022). Os três parâmetros apontaram que as linhagens FC 208, FC 2009, Pingo de Ouro e FC 2007 apresentaram mais pigmentação amarela que as demais linhagens, sugerindo que essas linhagens podem ter sido mais afetadas pelas condições climáticas da região, refletindo no baixo índice de produtividade desses genótipos. Resultados similares foram encontrados por Gracia-Romero et al. (2020) em que os componentes  $b^*$  e  $v^*$  estavam mais relacionadas à cor amarela da folha.

Além disso, os índices também apontaram que as linhagens FC 2309, FC 602, FC 2006, FC 2309, FC 1402 e FC 406 tinham baixo índice de pigmentos amarelos em suas folhas, o que implica em maior área fotossintética ativa e, conseqüentemente, produção mais eficiente de fotoassimilados, resultando em maior produtividade dessas plantas. Na Figura 5, é possível observar que esses parâmetros apresentaram relação inversa com a produtividade evidenciando que foram altamente eficazes para a seleção de plantas de feijão-caupi, ao identificar as linhagens menos produtivas com base nos tons amarelados das imagens.

A linhagem FC 1402, que se destacou como o genótipo com maior altura de planta, também expressou os melhores índices de verde em praticamente todos os parâmetros da análise de imagens. No entanto, apesar dessas características promissoras, ela não se destacou como a mais produtiva.

O fato de plantas apresentarem abundante matéria verde, não garante que todos os recursos (como nutrientes e água) estejam sendo utilizados de forma eficiente (SILVA et al., 2023). O "consumo de luxo" ocorre quando plantas absorvem mais nutrientes do que precisam para seu desenvolvimento, canalizando esses recursos para o aumento da biomassa vegetativa em vez da produção de grãos. Esse fenômeno pode resultar em competição interna por luz e nutrientes, prejudicando o desenvolvimento reprodutivo (RAJCAN e SWANTON, 2001).

Genótipos específicos podem ser mais propensos a esse comportamento, acumulando biomassa verde sem eficiente conversão em produção agrícola (LI et al., 2015). Em resumo, o

conceito de "consumo de luxo" destaca a importância de um equilíbrio entre o crescimento vegetativo e a produção de grãos. Embora o vigor vegetativo seja importante para o crescimento inicial da planta, a eficiência na conversão desse crescimento em produtividade final é crucial para garantir uma alta produtividade.

Por outro lado, a produção de matéria verde contribui significativamente para a captura de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da atmosfera, através da absorção de CO<sub>2</sub> durante a fotossíntese, convertendo-o em biomassa. Essa biomassa, quando incorporada ao solo, aumenta o conteúdo de matéria orgânica, melhorando a estrutura e a fertilidade do solo, além de sequestrar carbono de forma estável e duradoura (SANTOS, 2023).

Pesquisas anteriores indicam que a cultura do feijão-caupi pode desempenhar um papel significativo no sequestro de carbono. Em 2018, um estudo demonstrou a ocorrência de sequestro de carbono associada a essa cultura, o que sugere seu potencial para contribuir para práticas agrícolas mais sustentáveis (RIBEIRO et al., 2018). Em 2020, um estudo da Embrapa analisou o sequestro de carbono associado à produção de diferentes culturas agrícolas. Os resultados mostraram que o milho (*Zea mays*) apresentou alto potencial para captura de carbono, independentemente do sistema de cultivo utilizado, devido à sua alta produtividade (BOGIAN et al., 2020). Dessa forma, o cultivo de feijão-caupi, principalmente realizada pela agricultura familiar, onde geralmente evitam o uso excessivo de agroquímicos e maquinários pesados, não só beneficia a produção agrícola, mas também contribui para a mitigação das mudanças climáticas através do sequestro de carbono.

Diante do exposto, a linhagem FC 1402 será considerada uma linhagem superior de acordo com o objetivo do programa de melhoramento genético.

Os resultados obtidos neste estudo estão em concordância com os achados por Chapu et al. (2024), que destacam a importância da aplicação de técnicas de sensoriamento em seleção de linhagens em programas de melhoramento genético, em seu trabalho ele afirma que índices de espaço de cores RGB e índices de vegetação são fortemente associados e portanto podem ser utilizados para seleção de linhagens a partir de imagens do dossel.

#### 4 CONCLUSÕES

- Os índices de cores provenientes de imagens RGB, calculados a partir do software Breedpix mostrou-se eficaz para a identificação de linhagens com melhores potenciais produtivos de feijão-caupi.

- As linhagens que expressaram melhores desempenhos para o estado do Tocantins foram FC 602, FC 2006, FC 1103 e FC 2309.

- Os parâmetros Hue e GGA foram fortemente associados ao índice de produtividade, enquanto os parâmetros  $b^*$ ,  $v^*$  e CSI se mostraram inversamente proporcional ao aumento produtivo.

## REFERÊNCIAS

- ABOUGUI, K.; BOUGHATTAS, N. E. H.; BELHAJ, M.; BUCHAILLOT, M. L.; SEGARRA, J.; DORBOLO, S.; AMAMI, R.; CHEHAIBI, S.; TARCHOUN, N.; KEFAUVER, S. C. Assessing Phytosanitary Application Efficiency of a Boom Sprayer Machine Using RGB Sensor in Grassy Fields. **Sustainability**, v. 14, n. 6, p. 3666, 2022.
- AGROLINK. Cotação de feijão-caupi SC 60kg. **Agrolink**, 2024. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/cotacoes/graos/feijao/feijao-caupi-sc-60kg/#>. Acesso em: 04 jul. 2024.
- ANDRADE, A. O. de; RAIHER, A. P. Impacto socioeconômico da cultura da soja nas áreas mínimas comparáveis do Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, n. 1, p. e267567, 2023.
- ARAUS, J. L.; KEFAUVER, S. C. Breeding to adapt agriculture to climate change: affordable phenotyping solutions. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 45, p. 237-247, 2018.
- BATISTA, M. H.; DE NARDIN, D.; SIMÕES, D. de S.; CRUZ, P. P. N.; CARVALHO, J. da C. **Elaboração das cartas climáticas do Estado do Tocantins**. Secretaria da Fazenda e Planejamento – SEFAZ. Série Tocantins/Recursos Naturais/Cartas Climáticas – v. 1. 464 p. Palmas: SEFAZ/GZT, 2020. Disponível em: <https://central.to.gov.br/download/213396>. Acesso em: 24 jun. 2024.
- BOGIANI, J. C.; FERREIRA, A. C. de B.; BORIN, A. L. D. C.; SOFIATTI, V.; PERINA, F. J. Sequestro de carbono em sistemas de produção de grãos e fibras em solo arenoso do Cerrado da Bahia. Campinas: **Embrapa Territorial**, 2020. 29 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 34).
- BUCHAILLOT, M. L.; GRACIA-ROMERO, A.; VERGARA-DIAZ, O.; ZAMAN-ALLAH, M. A.; TAREKEGNE, A.; CAIRNS, J. E.; PRASANNA, B. M.; ARAUS, J. L.; KEFAUVER, S. C. Evaluating maize genotype performance under low nitrogen conditions using RGB UAV phenotyping techniques. **Sensors**, v. 19, n. 8, p. 1815, 2019.
- BUCHAILLOT, M. L.; GRACIA-ROMERO, A.; ZAMAN-ALLAH, M. A.; TAREKEGNE, A.; PRASANNA, B. M.; CAIRNS, J. E.; ARAUS, J. L.; KEFAUVER, S. C. Evaluating the performance of different commercial and pre-commercial maize varieties under low nitrogen conditions using affordable phenotyping tools. In: **Proceedings**. MDPI, 2018. p. 366.
- CASTRO-VALDECANTOS, P.; APOLO-APOLO, O. E.; PÉREZ-RUIZ, M.; EGEEA, G. Leaf area index estimations by deep learning models using RGB images and data fusion in maize. **Precision Agriculture**, v. 23, n. 6, p. 1949-1966, 2022.
- CAVALCANTE, W. S. da S.; SILVA, N. F.; TEIXEIRA, M. B.; ZANOTTO NETO, G.; CABRAL FILHO, F. R.; CUNHA, F. N.; CORRÊA, F. R. Technologies and innovations in the use of drones in agriculture. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 1, p. 7108-7117, jan. 2022.
- CHAPU, I.; CHANDEL, A.; SIE, E. K.; OKELLO, D. K.; OTENG-FRIMPONG, R.; OKELLO, R. C. O.; HOISINGTON, D.; BALOTA, M. Comparing regression and classification models to estimate leaf spot disease in peanut (*Arachis hypogaea* L.) for

implementation in breeding selection. **Agronomy**, v. 14, p. 947, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy14050947>.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: Safra de grãos 2023/2024 – 9º levantamento. Feijão caupi total (1ª, 2ª e 3ª safra)**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/safra-graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 21 jun. 2024.

CONAB. **Séries históricas das safras. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2024**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/serie-historica-das-safra-graos-2>. Acesso em: 21 jun. 2024.

MCEWEN, J.; BARDNER, R.; BRIGGS, G. G.; BROMILOW, R. H.; COCKBAIN, A. J.; DAY, J. C.; FLETCHER, K. E.; LEGG, B. J.; ROUGHLEY, R. J.; SALT, G. A. The effects of irrigation, nitrogen fertilizers, and pest and pathogen control on spring-sown field beans (*Vicia faba* L.) and residual effects on two succeeding winter wheat crops. **The Journal of Agricultural Science**, v. 96, n. 1, p. 129-150, 1981.

FAO. **Banco de dados FAOSTAT**. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL/visualize>. Acesso em: 20 jun. 2024.

FERREIRA, D. F. **Sisvar: sistema de análise estatística**. Versão 5.6. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2014.

FERREIRA, F. E. P. **Rendimento do feijão-caupi submetido ao estresse hídrico em diferentes cenários produtivos**. 2023. 96 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2023.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. de M.; SILVA, K. J. D. e; NOGUEIRA, M. do S. da R.; RODRIGUES, E. V. Feijão Caupi no Brasil: produção, melhoramento genético, avanços e desafios. **Embrapa Meio-Norte**, Teresina, 2011. 84 p. ISBN 978-85-88388-21-5.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: Fealq, 2009.

GOYAL, K.; SINGH, N.; JINDAL, S.; KAUR, R.; GOYAL, A.; AWASTHI, R. Kjeldahl Method. In: **Advanced Techniques of Analytical Chemistry**, v. 1, n. 1, p. 105-112, 2022.

GRACIA-ROMERO, A.; KEFAUVER, S. C.; VERGARA-DÍAZ, O.; HAMADZIRIPI, E.; ZAMAN-ALLAH, M. A.; THIERFELDER, C.; BODDPALLI, M. P.; JILL, E. C.; ARAUS, J. L. Leaf versus whole-canopy remote sensing methodologies for crop monitoring under conservation agriculture: a case of study with maize in Zimbabwe. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 16008, 2020.

GRACIA-ROMERO, A.; VERGARA-DÍAZ, O.; THIERFELDER, C.; CAIRNS, J. E.; KEFAUVER, S. C.; ARAUS, J. L. Phenotyping Conservation Agriculture Management Effects on Ground and Aerial Remote Sensing Assessments of Maize Hybrids Performance in Zimbabwe. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 349, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs10020349>.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais climatológicas do Brasil. Banco de dados meteorológicos do INMET.** Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/#>. Acesso em: 24 jun. 2024.

ISEKI, K.; OLALEYE, O.; ISHIKAWA, H. Intra-plant variation in seed weight and seed protein content of cowpea. **Plant Production Science**, v. 23, n. 1, p. 103–113, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1343943X.2019.1677161>.

LI, T.; HEUVELINK, E.; MARCELIS, L. F. M. Quantifying the source–sink balance and carbohydrate content in three tomato cultivars. **Frontiers in Plant Science**, Sec. Plant Breeding, v. 6, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00416>.

MENEZES, C. B. de; SILVA, K. J. da; SANTOS, C. V. dos. Melhoramento genético de sorgo. In: EMBRAPA MILHO E SORGOS. **Melhoramento genético de sorgo granífero**. 2021. p. 546. DOI: 978-65-87380-58-2.

OCCELLI, M.; COMPAORE, E.; BROWN, D.; BARRY, F.; PODA, L. S.; TRAORE, F.; WAONGO, A.; RUBIN, D.; TUFAN, H. A. Ex-ante priority setting in crop breeding: Towards inclusive innovation for impact. **Agricultural Systems**, v. 217, p. 103952, 2024.

OLIVEIRA, C. N. G. dos S. O. **Desempenho agrônômico, qualidade e diversidade genética de genótipos de feijão-caupi para produção de grãos verdes**. 60 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural do Semi-árido, Mossoró-RN, 2016.

OSIPITAN, O. A.; FIELDS, J. S.; LO, S.; CUVACA, I. Production Systems and Prospects of Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) in the United States. **Agronomy**, v. 11, p. 2312, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11112312>.

PEREIRA, H. S.; MORAIS, J. C.; VIEIRA, S. A. Application of image analysis to plant breeding: the use of Breedpix software. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 178, p. 105777, 2020. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105777.

PNUD, **Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Índice de desenvolvimento humano municipal** – AtlasBR. Disponível em: <http://www.atlasbrasil.org.br/ranking>. Acesso em: 12 maio 2024.

POINTER, M. R. A comparison of the CIE 1976 color spaces. **Color Research and Application**, v. 6, n. 2, p. 108-118, 2009. DOI: 10.1002/col.5080060212.

RAJCAN, I.; SWANTON, C. J. Understanding maize-weed competition: resource competition, light quality and the whole plant. **Field Crops Research**, v. 71, p. 139-150, 2001.

RAMBO, L.; COSTA, J. A.; PIRES, J. L. F.; PARCIANELLO, G.; FERREIRA, F. G. Rendimento de grãos da soja e seus componentes por estrato do dossel em função do arranjo de plantas e regime hídrico. **Scientia Agraria**, v. 3, n. 1-2, p. 79-85, 2002.

RAMOS, H. M. M.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; RIBEIRO, V. Q.; NASCIMENTO, F. N. do. Produtividade de grãos verdes do feijão-caupi sob diferentes regimes hídricos. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 4, p. 683-694, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000400008>.

RAPP, R.; WENDEL, J. Epigenetics and plant evolution. **The New Phytologist**, v. 168, n. 1, p. 81-91, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01491.x>.

RIBEIRO, A. A.; DE SOUSA LIMA, J. R.; SOUZA, R. M. S.; ANTONINO, A. C. D.; DE SOUZA, E. S. Fluxos de carbono e evapotranspiração de feijão comum sob condições de sequeiro. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 26, n. 3, p. 229-239, 2018.

RIBEIRO, E. M.; DANTAS, J. L. Impactos socioeconômicos da agricultura no desenvolvimento regional. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 2016.

ROCHA, P. A. de F. **Adaptabilidade e estabilidade de linhagens experimentais de feijão-comum em área de Cerrado**. Universidade Estadual Paulista – Unesp. Trabalho de Conclusão de Curso. Iha solteira, 56 p., 2022.

SANTOS, C. T. **Alteração na dinâmica de carbono em rotação milho-feijão no semiárido sergipano devido às mudanças climáticas**. Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2023.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. ISBN 978-85-7035-800-4.

SILVA, T. A. M.; HARTMANN, J. K.; KLEIN, M. G.; SANTOS, T. A.; FERRARI, M. M.; PEREIRA, S. R.; VIEIRA, C. A.; ALMEIDA, G. S. Trade-offs between growth and resource use efficiency in plants: a meta-analysis. **Functional Ecology**, v. 37, n. 8, p. 1984-1996, 2023. DOI: 10.1111/1365-2435.14284.

SIMONE, M. de; GARCÍA, A. A.; MARTÍNEZ, J. L.; RIVERA, F. J.; SIMPSON, R. E.; CASTAÑO, L. E. Adaptación de variedades y líneas de judías secas (*Phaseolus vulgaris* L.) a la recolección mecánica directa. **Salta: INTA**, 1992. 5 p.

SINCLAIR, T. R.; JAMIESON, P. D. Grain number, wheat yield, and bottling the future. **Field Crops Research**, v. 98, n. 2-3, p. 60-67, 2006.

SOUZA, C. A. F. **Comunicado Técnico 06 – Fenotipagem de plantas: uma nova abordagem para um velho problema**. Brasília-DF: Embrapa, 2014. ISSN 2177-4447.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2004. 416 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TEIXEIRA, N. J. P.; de FÁTIMA MACHADO, C.; FREIRE FILHO, F. R.; de MOURA ROCHA, M.; GOMES, R. L. F. Produção, componentes de produção e suas inter-relações em genótipos de feijão-caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] de porte ereto. **Revista Ceres**, v. 54, n. 314, p. 374-382, 2007.

THE JAMOVI PROJECT. **Jamovi: statistical software**. Versão 2.0. Sydney: The Jamovi Project, 2021. Disponível em: <https://www.jamovi.org>. Acesso em: 25 jun. 2024.

ZAMAN-ALLAH, M.; VERGARA, O.; ARAUS, J. L.; TAREKEGNE, A.; MAGOROKOSHO, C.; ZARCO-TEJADA, P. J.; HORNERO, A.; HERNÁNDEZ ALBÀ, A.; DAS, B.; CRAUFURD, P.; OLSEN, M.; PRASANNA, B. M.; CAIRNS, J. Unmanned aerial platform-based multi-spectral imaging for field phenotyping of maize. **Plant Methods**, v. 11, n. 35, 2015.

ZHAO, D.; RYDER, M. H.; TANG, C. Relationships between stem diameter, height, and yield in soybean under varying nitrogen treatments. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 3, p. 826-833, 2017.

ZHOU, J.; BECHE, E.; VIEIRA, C. C.; YUNGBLUTH, D.; ZHOU, J.; SCABOO, A.; CHEN, P. Improve soybean variety selection accuracy using UAV-based high-throughput phenotyping technology. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 768742, 2022.