



MATHEUS MACHADO GUIMARÃES

**FENOTIPAGEM DE ALTO RENDIMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO DE
LINHAGENS DE SOJA EM VCU**

LAVRAS - MG

2023

MATHEUS MACHADO GUIMARÃES

**FENOTIPAGEM DE ALTO RENDIMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO DE
LINHAGENS DE SOJA EM VCU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte
das exigências do Curso de Agronomia, para a
obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi
Orientador
Prof. Msc. Mateus Ribeiro Piza
Coorientador

**LAVRAS - MG
2023**

RESUMO

O sensoriamento remoto pode auxiliar os programas de melhoramento através da fenotipagem de plantas, possibilitando a obtenção de imagens por sensores RGB acoplados a aeronaves remotamente pilotadas, como RPA, permitindo avaliar características como estrutura do dossel das plantas, e gerando assim resultados eficientes e de baixo custo. Logo, objetivou-se mensurar a eficiência de técnicas de fenotipagem de alto rendimento visando a caracterização de diferentes linhagens de soja em avaliação de Valor de Cultivo e Uso (VCU), sob diferentes épocas e densidades de semeadura. Foram instalados três experimentos, em que cada qual corresponde a uma época de semeadura, sendo realizados nas datas 14 de outubro, 01 e 16 de novembro de 2022. O delineamento adotado foi em blocos completamente casualizados com três repetições. Os tratamentos foram organizados conforme o esquema de parcela subdividida 6 x 6. Os tratamentos foram: época de semeadura, cultivares sendo quatro comerciais e duas linhagens do programa de melhoramento da UFPA e densidade populacional, sendo estas: 200, 240, 280, 320, 360 e 400 mil plantas/ha. A parcela foi constituída de quatro linhas, com espaçamento de 0,6 x 5,5 metros de comprimento. Foram analisadas as seguintes variáveis; altura de plantas, diâmetro de copas e produtividade de grãos. As imagens foram coletadas com uma RPA Phantom 4 equipado com sensor RGB e altura de voo de 30 m. Os dados foram analisados no ambiente R e a cobertura vegetal do dossel feita no QGIS. A escolha da época e da densidade de semeadura tem impacto significativo na produtividade de linhagens no Campo das Vertentes. As linhagens VCU-9 e VCU-12 demonstram-se promissoras. Em geral, a plasticidade fenotípica das linhagens avaliadas apresentou grande variabilidade entre as densidades, o que indica que cada linhagem tem um comportamento específico para as combinações destes fatores, devendo então ser analisados de forma pontual. Para cobertura do dossel, os resultados destacam uma interação específica das linhagens nas diferentes épocas de semeadura, entretanto, em virtude da identificação de um efeito não linear entre as densidades de semeadura nas diferentes épocas, não foi possível identificar uma relação direta da contagem de pixels com a cobertura do dossel das linhagens estudadas.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merr.; Densidade; Época de semeadura; Fenotipagem.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	4
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	6
2.2.	Densidade e época de semeadura.....	9
2.3.	Melhoramento da soja no Brasil	11
2.4.	Valor de cultivo e uso (VCU)	13
2.5.	Fenotipagem de alto rendimento.....	15
3.	METODOLOGIA.....	18
3.1.	Experimento.....	18
3.2.	Condução do experimento	20
3.3.	Variáveis analisadas	20
3.4.	Fenotipagem de alto rendimento.....	21
3.5.	Análise dos dados	22
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5.	CONCLUSÃO.....	35
	REFERÊNCIAS.....	36

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L. Merr.), é a principal cultura produzida e comercializada pelo Brasil, representando cerca de 49% da produção de grãos no país. Na safra 2022/23, a soja foi semeada em mais de 44 milhões de hectares, com um aumento de 6,2% quando comparada a safra anterior. Com o crescimento da cultura nas últimas décadas, organizações associadas aos diferentes setores de produção, tem impulsionado cada vez mais investimentos em altas tecnologias para o manejo da cultura, principalmente relacionadas ao melhoramento genético, permitindo à obtenção de plantas mais adaptadas e com melhor desempenho para ampla recomendação, através da seleção de linhagens que contenham todas as características desejáveis.

A ocorrência de interação genótipos por ambientes remete na expressão diferencial das linhagens ao longo das áreas de cultivo o que implica na necessidade de seleção e recomendação das cultivares mais adaptadas e estáveis. Dentre as características que são fortemente influenciadas pelo ambiente na cultura da soja, destaca-se o fotoperíodo, que reflete diretamente na produtividade de grãos e que pode ser trabalhado em função da época e a densidade de semeadura. Neste contexto, técnicas de agricultura de precisão e bioinformática podem ser empregadas para tornar o procedimento de recomendação de cultivares mais assertivo (FIETZ; RANGEL, 2008; XAVIER *et al.*, 2017).

O sensoriamento remoto tem auxiliado amplamente os programas de melhoramento por meio da fenotipagem de plantas. Esta técnica consiste na utilização de imagens que são obtidas através de sensores RGB de alta resolução ou multiespectrais acoplados a RPAs permitindo a análise de uma gama de informações, gerando resultados precisos, eficientes e de baixo custo (TATTARIS, REYNOLDS, CHAPMAN, 2016; WEISS, JACOB, DUVEILLER, 2020).

Na literatura, há relatos da eficiência da fenotipagem na soja auxiliando no melhoramento da cultura, avaliando desde a cobertura do dossel de plantas a características de vigor, área foliar, além do desenvolvimento das plantas sob algum tipo de estresse (AASEN *et al.*, 2020; ANDRADE *et al.*, 2021; BAI *et al.*, 2016; MOREIRA *et al.*, 2019; ROTH *et al.*, 2018; XAVIER *et al.*, 2017).

Apesar de apresentar resultados promissores, técnicas de fenotipagem de plantas ainda necessitam de mais pesquisas, para se aprimorar os métodos aplicados a caracterização de linhagens em fase final de um programa de melhoramento, à fim de auxiliar na recomendação de genótipos superiores, sobretudo em condições de clima tropical de altitude.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de linhagens de soja submetidas a diferentes épocas e densidades de semeadura, bem como a eficiência da fenotipagem de alto rendimento para estimar a cobertura do dossel das plantas nas diferentes combinações dos fatores em avaliação e identificar a relação de causa entre as variáveis analisadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Ecofisiologia da soja

A soja pertence à família das leguminosas, subfamília Fabaceae, sendo uma planta anual com características herbáceas e crescimento vertical. O ciclo de crescimento pode variar de 75 dias (mais precoces) a 200 dias (mais tardias), assim como a altura da planta, que pode variar de 30 a 200 cm e afetar a quantidade de ramificações, entre outros aspectos. (MÜLLER, 1981).

O sistema radicular da soja é composto por uma raiz axial principal e raízes secundárias. (SEDIYAMA *et al.*, 1985). As raízes da planta abrigam nódulos que representam a simbiose entre a soja e bactérias do gênero *Bradyrhizobium*. Essas bactérias facilitam a fixação do nitrogênio atmosférico, disponibilizando-o para a planta de maneira assimilável na forma de nitrato, recebendo em troca carboidratos. (MASCARENHAS *et al.*, 2005).

O caule da cultura apresenta características herbáceas, sendo ereto, pubescente e ramificado. Seu desenvolvimento tem início a partir do eixo embrionário logo após a germinação. O crescimento do caule pode ser influenciado por fatores externos, mas geralmente segue um padrão ortótropo na maioria das cultivares. O hábito de crescimento da planta pode ser classificado como determinado, semideterminado ou indeterminado (MÜLLER, 1981).

Ao longo do crescimento e desenvolvimento, a planta de soja pode apresentar quatro tipos distintos de folhas: as cotiledonares, unifolioladas, trifolioladas e prófilos (LERSTEN; CARLSON, 2004; MULLER, 1981). As folhas de soja variam de verde-claras a verde-escuras, de acordo com a idade, variedade e os fatores ambientais, especialmente a nutrição nitrogenada e a provisão de ferro (MULLER, 1981).

As flores da soja são completas e se agrupam em racemos que podem ser terminais ou axilares. Quanto à coloração, podem ser brancas ou púrpuras, sendo que a tonalidade púrpura varia de acordo com a genética da cultivar (VERNETTI e JUNIOR, 2009). A soja é sensível ao fotoperiodismo e é categorizada como uma planta de dias curtos, exigindo um período mínimo de horas de escuro para desencadear o processo de floração. No entanto, é importante ressaltar que essa característica varia conforme a cultivar (ROCHA, 2009).

O fruto da soja é do tipo legume, comumente chamado de vagem, que resulta do ovário completamente desenvolvido. Uma vagem pode conter uma a cinco sementes, contudo, a maioria dos cultivares apresenta vagens com duas ou três sementes (Sedyama *et al.*, 1985).

Entre os fatores ambientais que mais influenciam no desenvolvimento da cultura estão o fotoperíodo, a temperatura e a disponibilidade hídrica (OLIVEIRA, 2010). Esses fatores

exercem influência sobre o número de primórdios reprodutivos e a taxa de desenvolvimento, e com isso apresentam reflexos na estatura de planta, no ciclo e no potencial produtivo da cultura (RODRIGUES *et al.*, 2006; JIANG *et al.*, 2011). O fotoperíodo é o principal fator ambiental para que a planta atinja o estado juvenil e, influenciando no seu porte, na altura de inserção de primeira vagem e em outras características que irão afetar a produtividade de grãos (EMBRAPA, 2011).

No início da fase vegetativa, temperaturas acima de 30° C aceleram a respiração e prejudicam a síntese e a translocação de carboidratos para os meristemas, sendo que a temperatura ótima para o desenvolvimento da maioria dos processos e mecanismos fotossintéticos da soja encontra-se em torno de 25-30° C. Essa alteração, em muitas cultivares, acaba comprometendo o crescimento e antecipando o processo reprodutivo (EMBRAPA, 2011). Quando ocorrem temperaturas abaixo de 10° C, acaba diminuindo o acúmulo de matéria seca, retardando a entrada da planta no período reprodutivo (DAROISH *et al.*, 2005).

O fotoperíodo curto juntamente com temperatura alta, segundo Kunz *et al.* (2014), controla a indução floral e, por consequência, afeta o crescimento e o desenvolvimento das plantas. O fotoperíodo crítico refere-se ao comprimento do período luminoso indutor de importantes modificações fisiológicas nos vegetais, principalmente na floração, sendo capaz de alterar a formação de botões florais.

Cada cultivar tem o seu fotoperíodo crítico, ou seja, cultivares de período juvenil curto apresentam certa capacidade de percepção fotoperiódica a partir do surgimento das folhas unifolioladas, quando alteração no fotoperíodo que seja menor à quantidade de luz necessária, induzira a planta florescer (SEDIYAMA *et al.*, 2015). Em plantas com período juvenil longo, a percepção à indução ao florescimento pode ocorrer a partir da 5^a - 7^a folha trifoliolada, ou seja, enquanto a planta não atinge esse estágio de desenvolvimento, ela não será induzida ao florescimento, mesmo que tenha atingido seu fotoperíodo crítico (SEDIYAMA *et al.*, 2015).

Quanto à água nos cultivos de sequeiro, mesmo com o extenso conhecimento sobre o cultivo da soja, a principal restrição para manifestar o pleno potencial de rendimento da cultura ainda reside na disponibilidade hídrica durante a estação de crescimento (FARIAS *et al.*, 2001), já que a planta de soja é composta por 90% de água, atuando em todos os processos fisiológicos e bioquímicos (EMBRAPA, 2011). Assim, a disponibilidade de água é um fator determinante para um bom desenvolvimento, principalmente em dois períodos críticos: germinação/emergência e floração/enchimento de grãos (NAOE *et al.*, 2017).

Na fase reprodutiva, após o florescimento da cultura, a deficiência hídrica prolongada reduz drasticamente a produtividade, visto que compromete a formação adequada de vagens e

sementes. Portanto, nessa fase, é importante que a disponibilidade hídrica seja em torno de 7 a 8 mm dia⁻¹ (FARIAS *et al.*, 2007), principalmente em cultivares com arquitetura mais eficiente na captação de luz, em decorrência de maiores taxas de fotossíntese e transpiração (CASAROLI *et al.*, 2007).

Dessa forma, a precipitação é um dos fatores climáticos de suma importância para a cultura, uma vez que a falta ou o excesso, dependendo da fase fenológica em que a cultura se encontra, pode ocasionar grandes prejuízos, tanto no acúmulo de matéria seca como na produtividade e qualidade dos grãos (FLUMIGNAN *et al.*, 2015).

Para melhorar o entendimento e a comunicação entre os envolvidos com a cultura, é essencial que haja o entendimento de como as plantas crescem e se desenvolvem em uma lavoura. Para tal entendimento foi desenvolvido uma metodologia de descrição única e universal proposta por Fehr e Caviness (1977), que é a mais utilizada no mundo inteiro por apresentar todas essas características (CÂMARA, 1998).

Essa metodologia separa os estádios de desenvolvimento em dois períodos, vegetativo e reprodutivo. Sendo que o período vegetativo, denominado pela letra V, inicia com a emergência das plântulas, até o desenvolvimento completo das folhas, classificados por subdivisões de V1, V2, V3...Vn, em que ocorre o início do florescimento (NOGUEIRA *et al.*, 2009; THOMAS, 2018) (Tabela 1).

Na fase reprodutiva, que inicia com o florescimento, os estádios são denominados pela letra R, seguida por números que vão do um ao oito (R1, R2, R3, ...R8), neste período a planta vai do florescimento-maturação com a formação do legume, o enchimento do grão e a maturação da planta, sendo que cada subperíodo descreve o momento de desenvolvimento da cultura, ou seja, florescimento (R1 e R2), desenvolvimento da vagem (R3 e R4), desenvolvimento do grão (R5 e R6), maturidade fisiológica (R7), maturação plena (R8), quando a soja apresenta menos de 15% de umidade (NOGUEIRA *et al.*, 2009; THOMAS, 2018) (Tabela 1).

Tabela 1 - Estádios vegetativos e reprodutivos da planta de soja

Estádios vegetativos	Estádios reprodutivos
VE – Emergência	R ₁ – Início do florescimento
VC – Cotilédone	R ₂ – Pleno florescimento
V ₁ – Primeiro nó	R ₃ – Início da formação de vagens
V ₂ – Segundo nó	R ₄ – Plena formação de vagens
V ₃ – Terceiro nó	R ₅ – Início do enchimento de sementes
*	R ₆ – Pleno enchimento de sementes
*	R ₇ – Início da maturação
V(n) – enésimo nó	R ₈ – Maturação plena

Fonte: Adaptado de Fehr e Caviness.

2.2. Densidade e época de semeadura

A obtenção da máxima produtividade de soja está diretamente relacionada ao cultivo da oleaginosa em condições ideais que permitam a expressão total do seu potencial. Fatores como densidade populacional de plantas e o espaçamento entre linhas exercem influência significativa no acúmulo de matéria seca, na ocorrência de plantas daninhas, no fenômeno de acamamento, na propagação de doenças e, por consequência, na produtividade (BALBINOT JUNIOR *et al.*, 2015; VITORINO *et al.*, 2017).

O espaçamento entre linhas e a densidade de semeadura de soja têm um impacto significativo na competição interespecífica e intraespecífica das plantas por recursos do solo, em particular água e nutrientes causam mudanças morfológicas nas plantas, especialmente em sua altura, comprimento dos ramos e o número de vagens, que são os principais componentes da produção. (SOARES *et al.*, 2015; SOUZA *et al.*, 2017).

O espaçamento entre linhas determina o arranjo espacial das plantas no campo, o que afeta o grau de consumo de luz, água e nutrientes e é uma ferramenta importante para otimizar o crescimento das plantas, o crescimento da biomassa e a produção obtida. (DEVLIN *et al.*, 1995; DIMA *et al.*, 2017).

Quando a densidade populacional de plantas recomendada não é adequada para uma determinada cultivar de soja, pode ocorrer competição interespecífica por água, luz e nutrientes. Essa competição pode levar à expansão excessiva da área foliar em detrimento do crescimento do caule, resultando em plantas maiores predominando sobre as menores, o que reduz o potencial produtivo destas últimas e compromete o enchimento dos grãos. Além disso, esse

desajuste na proporção entre o sistema radicular e a parte aérea também pode ser observado (PETTER *et al.*, 2016; PENGELLY; BLAMEY; MUCHOW, 1999; OLIVEIRA *et al.*, 2015).

A soja apresenta alta plasticidade fenotípica, a qual é definida como a capacidade de a planta alterar sua morfologia e componentes de rendimento a fim de adequá-los às condições impostas pelo arranjo espacial dos indivíduos (COOPERATIVE EXTENSION SERVICE AMES, 1994). Trabalhos realizados por Peixoto *et al.* (1999) e Mauad *et al.* (2010), demonstram que as plantas de soja compensam baixas populações de plantas com o aumento no número de nós reprodutivos, de vagens e de grãos por vagem. Büchling *et al.* (2017) não observaram diferenças significativas na produtividade de grãos ao estudar nove genótipos de soja em relação à densidade de semeadura, atribuindo esse resultado à plasticidade da cultura. Por outro lado, Cruz *et al.* (2016) observaram um aumento na produtividade à medida que a densidade de semeadura aumentava, atribuindo esse efeito ao número de vagens por planta e ao peso dos grãos.

Já de acordo com De Bruin e Pedersen (2008), em condições de umidade favorável, a soja apresenta maior rendimento com espaçamento entre linhas menor, enquanto em condições de seca, o rendimento é maior com um espaçamento maior entre linhas.

Diante dessas variações, é crucial estudar o comportamento de uma nova cultivar em diferentes densidades de semeadura. Isso é essencial para proporcionar recomendações precisas, visando explorar ao máximo o potencial genético da cultura, sem inflacionar os custos de produção e facilitando as práticas de manejo. Esse enfoque busca garantir uma maior rentabilidade no cultivo de soja.

Na fase inicial de estabelecimento de uma lavoura de soja, a época de semeadura desempenha um papel fundamental, levando em consideração as condições de fotoperíodo, temperatura e precipitação, as quais são influenciadas pela densidade de semeadura adotada.

Na determinação do Grupo de maturação (GM), são representados por números de 0 a 10, que quanto maior é seu número mais próximo da linha do equador é sua região de adaptação, ou seja, cada grupo de maturação se ajusta em determinadas faixas de latitudes, em função da resposta ao fotoperíodo, que variam de acordo com a quantidade de horas/luz que foi exposta. Quanto mais perto da linha do Equador, na primavera e verão, a quantidade de horas/luz é menor em relação às regiões mais ao sul. Quanto menor a quantidade luminosa de que ela recebe, mais rapidamente entrará na fase reprodutiva (florescimento), encurtando assim o seu ciclo e reduzindo a altura de planta. Cabe salientar que o ciclo da cultivar aumenta com a latitude e diminui quando se desloca do Sul para o Norte (PERNARIOL, 2020).

Devido à interação genótipo por ambiente, a semeadura antecipada ou tardia em relação à época recomendada pode ocasionar alterações fenotípicas na planta. Na região sul, sudeste e Centro-Oeste do Brasil, a época adequada para semeadura de soja normalmente abrange a segunda metade de outubro até o final de novembro, sendo determinada de acordo com o grupo de maturidade relativa da linhagem (CÂMARA, 2015).

Plantios feitos em dezembro geralmente resultam em plantas de porte reduzido, maior incidência de ferrugem asiática (o que pode levar a uma desfolha intensificada) e enfrentam desafios relacionados à variabilidade das chuvas, o que pode aumentar os custos de produção. No entanto, é importante destacar que esses efeitos variam entre as diferentes regiões produtoras e devem ser minuciosamente estudados para recomendar as linhagens mais adequadas a cada contexto (EMBRAPA, 2013).

2.3. Melhoramento da soja no Brasil

A soja cultivada (*Glycine max* (L.) Merrill) tem sua origem na região leste da Ásia, mais especificamente na região nordeste da China, conhecida como a Manchúria (Hymowitz, 1970). Após sua descoberta na China, a soja cultivada permaneceu na região oriental por cerca de dois milênios. Esse fato pode ser atribuído à natureza predominantemente autossuficiente da agricultura chinesa, o que limitou a disseminação de muitos cultivos para além desse território (Harlam, 1975). Na China antiga, o cultivo da soja desempenhou um papel vital e se tornou a base da alimentação da população, refletindo sua importância (Mascarenhas e Miyasaka, 1968). Com o aumento da sua relevância e do comércio, a soja foi gradualmente introduzida no Sul da China, Coréia, Japão e sudeste da Ásia. Sendo uma das culturas mais antigas, a soja chegou ao Ocidente no final do século XV e início do século XVI.

A introdução da soja no Brasil ocorreu em 1882, vinda dos Estados Unidos, com os primeiros estudos realizados na Bahia. No entanto, o primeiro registro de cultivo de soja aconteceu em Santa Rosa, no Rio Grande do Sul, em 1914, aproveitando as condições propícias para o seu desenvolvimento, semelhantes às do país de origem. O cultivo para fins econômicos teve início na década de 1940, mas somente após os anos 1960 a cultura da soja foi estabelecida como uma atividade de alto potencial econômico, contribuindo significativamente para o país (DALL'AGNOL, 2016).

A expansão da soja pelo país teve importantes contribuições, incluindo o apoio à triticultura para otimizar a exploração das áreas cultivadas durante o verão, a crescente demanda no mercado internacional, a substituição de gorduras de origem animal por vegetais, a

viabilização da mecanização na cultura e, principalmente, o desenvolvimento de cultivares menos sensíveis ao fotoperíodo ou cultivares com período juvenil longo (EMBRAPA, 2003; EMBRAPA, 2013).

O êxito notável no ecossistema produtivo da soja no Brasil é resultado dos avanços na pesquisa direcionada ao manejo e melhoramento genético. Esses avanços foram impulsionados em 1974, com o estabelecimento da Embrapa Soja (DALL'AGNOL, 2016), em reconhecimento à importância da cultura e às projeções de crescimento nas décadas seguintes, visando atender à demanda mundial. Essa trajetória leva em consideração a capacidade do Brasil de ampliar a produção global.

O cultivo bem-sucedido de soja em regiões de baixa latitude e a expansão para novas áreas são viabilizados por avanços agronômicos essenciais e pelo contínuo melhoramento genético, incluindo adaptações ao período juvenil prolongado das plantas. A adaptação genética das variedades, selecionadas para resistência a estresses e características específicas das condições regionais, é fundamental para o sucesso do cultivo. Além disso, o manejo eficiente da água, solo e controle integrado de pragas são cruciais para maximizar a produtividade. A aplicação de tecnologia e pesquisa contínua são essenciais para otimizar o cultivo da soja, promovendo uma agricultura mais sustentável e produtiva, vital para suprir as demandas alimentares globais.

Atualmente, o Brasil se posiciona como o principal produtor e exportador de soja no mundo, superando os Estados Unidos, que eram os antigos detentores desse título. Na última safra, a produção de soja atingiu 154,6 milhões de toneladas, registrando um aumento significativo de 23,2% em volume em comparação à safra anterior (2021/22). Isso foi alcançado em uma área de 44.075,6 mil hectares, o que representa um crescimento de 6,2% comparado a safra anterior (CONAB, 2023).

Minas Gerais foi identificado como um estado promissor para o crescimento da produção de soja, com uma estimativa de aumento de cerca de 15%. Isso é especialmente evidente na região do Triângulo Mineiro, onde houve expansão significativa das áreas cultivadas (CANAL RURAL, 2014). De acordo com dados mais recentes da Conab (2023), a safra atual apresentou um acréscimo de 9,5% na área cultivada em Minas Gerais. A produção atingiu 8.346,5 milhões de toneladas, abrangendo uma área de 2.171,3 milhões de hectares.

O cultivo de soja em Minas Gerais enfrenta um conjunto de desafios e apresenta perspectivas interessantes do ponto de vista agronômico. No âmbito dos desafios, destaca-se a variabilidade climática na região, o que influencia diretamente o ciclo de crescimento da soja, demandando uma seleção cuidadosa de variedades adaptadas e estratégias de manejo que

otimizem a resposta da planta às flutuações climáticas. Ademais, a irregularidade das precipitações e a ocorrência de estiagens são questões relevantes, demandando uma gestão eficaz da água, com foco em sistemas de irrigação eficientes e práticas de conservação hídrica no solo. A resistência a pragas e doenças também é um aspecto agrônômico crucial, exigindo estratégias de manejo integrado para garantir a saúde e o desenvolvimento da cultura.

Por outro lado, observam-se perspectivas positivas para o cultivo de soja em Minas Gerais. A demanda crescente e globalizada por produtos derivados da soja, como óleo, farelo e biocombustíveis, oferece uma oportunidade para expansão e maior rentabilidade para os produtores. A diversificação da produção agrícola, incluindo a prática de rotação de culturas com a soja, pode trazer benefícios ao solo, contribuindo para um sistema agrícola mais sustentável e equilibrado. Além disso, a integração de tecnologias avançadas, como sistemas de monitoramento e automação, pode proporcionar maior eficiência no manejo dos recursos, com aprimoramento na dosagem de insumos e detecção precoce de problemas, resultando em uma produção mais eficaz e competitiva.

2.4. Valor de cultivo e uso (VCU)

A principal abordagem para examinar o desempenho das cultivares é por meio da condução de ensaios de competição em diferentes épocas e ao longo de vários anos, abrangendo diversas localidades ou regiões. A análise desses ensaios permite a identificação das cultivares que demonstram uma adaptação superior em cada região, além de determinar a estabilidade de produção em diferentes ambientes. Essa avaliação é conduzida por meio de redes de ensaios internacionais, nacionais, regionais e locais (NUNES *et al.*, 2002).

No Brasil, foi estabelecido um sistema de legislação para fornecer uma base segura e precisa aos melhoristas nos programas de melhoramento genético. Esse sistema é conhecido como Registro Nacional de Cultivares (RNC) e Serviço Nacional de Proteção de Cultivares (SNPC). Esses setores estão sob a jurisdição do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), sendo responsável pela fiscalização, análise e registro das cultivares que têm permissão para serem comercializadas no país.

Para o registro e proteção no RNC, particularmente no caso da cultura da soja, os programas de melhoramento devem realizar ensaios em diferentes localidades, conforme as diversas regiões, para avaliar o Valor de Cultivo de Uso (VCU). No processo de avaliação, as linhagens de soja devem ser testadas em, pelo menos, um local em cada região edafoclimática considerada relevante para a cultura, ao longo de um período mínimo de dois anos. Essas

avaliações englobam não apenas características da planta, mas também aspectos agronômicos, sendo a produtividade uma avaliação de suma importância. Os ensaios de VCU são requisitos essenciais para o registro e proteção de novas cultivares no Brasil, em conformidade com a Lei nº 10.711, de 05 de agosto de 2003, regulamentada pelo Decreto nº 5.153, de 23 de junho de 2004 (MAPA, 2007).

O Valor de Cultivo e Uso (VCU) representa a combinação intrínseca das características agronômicas de uma cultivar com suas propriedades de uso em atividades agrícolas, industriais, comerciais e/ou de consumo. Isso engloba dados relativos à produtividade, comportamento diante de pragas e doenças, adaptação a diferentes regiões, entre outros aspectos relevantes para o mercado nacional ou internacional, que devem ser registrados conforme as leis estabelecidas pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA).

Os resultados dos testes de VCU possuem grande importância para os produtores, permitindo que avaliem previamente os materiais que serão lançados para comercialização e selecionem aqueles que melhor atendam às suas expectativas (ARAÚJO *et al.*, 2004).

Para conduzir um experimento de VCU em soja, é vital abranger uma amostra representativa das regiões edafoclimáticas relevantes para a cultura. A duração do experimento varia de acordo com o tipo de cultivar: para cultivares convencionais, são necessários dois anos de observações, enquanto para as cultivares essencialmente derivadas, apenas um ano, desde que o parental recorrente esteja inscrito no Registro Nacional de Cultivares (RNC) (MAPA, 2007).

O delineamento experimental adotado é o de blocos casualizados, com no mínimo três repetições, sendo que cada parcela deve possuir uma área útil mínima de 4,0 m². As cultivares são agrupadas em até seis categorias de maturação, facilitando a análise e compreensão do comportamento das diferentes linhagens (MAPA, 2007).

Durante o experimento, uma série de características é avaliada. Incluem-se descritores morfológicos da planta, como pigmentação do hipocótilo, tipo de crescimento, cor da pubescência e forma da semente. Além disso, características agronômicas, como o ciclo vegetativo, altura das plantas, altura de inserção das vagens inferiores e grau de acamamento, são minuciosamente observadas. A reação a doenças e nematoides também é considerada, avaliando a resistência ou suscetibilidade da cultivar (MAPA, 2007).

A produtividade das cultivares é um dos pontos centrais da avaliação, calculada a partir do rendimento da área útil das parcelas, padronizado para 13% de umidade e transformado em quilogramas por hectare. Experimentos com Coeficientes de Variação (CV) superiores a 20% não são considerados na análise de conjunto dos locais (MAPA, 2007).

Para ser inscrita no Registro Nacional de Cultivares (RNC), uma cultivar deve alcançar uma produtividade igual ou superior à média das testemunhas utilizadas no experimento. Caso contrário, o solicitante da inscrição deve apresentar características de relevância que justifiquem a inclusão no RNC (MAPA, 2007).

Além disso, a qualidade industrial das cultivares também é avaliada, considerando os teores de óleo e proteína nos grãos. As amostras para essas análises podem ser coletadas de apenas uma repetição de cada local do experimento (MAPA, 2007).

Assim, o experimento de VCU para a cultura da soja é um processo complexo e estruturado, fundamental para a avaliação precisa e objetiva de as novas cultivares, garantindo sua adaptação, produtividade e qualidade em diferentes contextos e regiões.

2.5. Fenotipagem de alto rendimento

Diante da revolução tecnológica, o setor agrícola tem enfrentado a necessidade de inovação, gradualmente incorporando equipamentos e tecnologias que visam proporcionar resultados superiores de maneira prática, economicamente viável e sustentável. A agricultura de precisão 4.0 tem disseminado de forma marcante a conectividade e automação de máquinas, incluindo sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (RPAs) ou drones, robôs, entre outros (ESPERIDIÃO *et al.*, 2019).

A utilização dos RPAs representa um diferencial significativo diante das limitações presentes em áreas agrícolas, como solo encharcado, declividade e restrições logísticas, as quais muitas vezes impossibilitam a entrada de tratores. Os RPAs oferecem uma abrangência maior para monitoramento de culturas, detecção de pragas e doenças, mapeamento agrícola e aplicação de defensivos, superando as restrições físicas que impactam a atuação terrestre dos tratores. (DE OLIVEIRA, ALTACIS JUNIOR *et al.*, 2020).

Os dispositivos de sensoriamento remoto mais frequentemente empregados na fenotipagem de plantas compreendem os sensores multiespectrais, hiperespectrais, de fluorescência e térmicos, bem como imageadores que utilizam a radiação refletida ou emitida pelo dossel. Adicionalmente, as câmeras digitais com filtros nas bandas do espectro vermelho, verde e azul (RGB) são extensamente adotadas nas abordagens atuais, principalmente devido ao seu custo acessível (ARAUS *et al.*, 2018).

As câmeras RGB têm sido empregadas em programas de melhoramento para mensuração de caracteres como biomassa da parte aérea (GOLZARIAN *et al.*, 2011; MARMAITIJANG *et al.*, 2019), componentes de rendimento (DUAN *et al.*, 2011), *stand* de

plantas (JIN *et al.*, 2017) e severidade de doenças (SUGIURA *et al.*, 2016). A avaliação de cobertura de dossel de uma maneira simples e precisa foi primeiramente proposta por Purcell (2000). O método consiste na medição da fração de pixels verdes em comparação ao número total de pixels em uma imagem. A cobertura de dossel equivale aproximadamente à fração da radiação solar interceptada.

No caso de avaliação de caracteres quantitativos, as câmeras RGB demandam alguns cuidados (LEBOURGEOIS *et al.*, 2008). Devido a variação das condições ambientais no momento da tomada de imagens, como luminosidade, presença de nuvens, chuva e outros, a qualidade das imagens obtidas podem apresentar distorções. A análise de imagens digitais geralmente é realizada utilizando algoritmos de processamento de cor, e esses são influenciados pelas condições locais de luminosidade, podendo reduzir a precisão e a qualidade dos dados obtidos.

Yang *et al.* (2020) ressaltam que, embora o sensoriamento remoto com RPAs tenha se mostrado uma ferramenta de grande potencial para a fenotipagem de alto rendimento, algumas restrições relacionadas ao seu uso devem ser abordadas como por exemplo: o tempo de voo e a capacidade de carga são limitadas; leis e regulamentos locais de voo podem ser uma restrição; requisitos estritos para técnicos de operação devem ser implementados para garantir a segurança do voo; uma baixa altitude de voo fornecerá imagens com maior qualidade, mas também poderá causar alterações na planta devido ao vento produzido pelo RPAs, além de resultar em tempo de voo mais longo.

O desenvolvimento de novas cultivares na agricultura envolve estratégias de cruzamento e avaliação em diversos ambientes para identificar materiais superiores. Essa avaliação demanda técnicas eficazes para otimizar tempo e recursos. Nos programas de melhoramento, a obtenção precisa de parâmetros para a seleção de novas cultivares é crucial. Contudo, as avaliações regulares, como fenologia e componentes de produção, geralmente são feitas manualmente, especialmente no setor público, consumindo tempo e mão de obra. A implementação de ferramentas de fenotipagem pode reduzir consideravelmente a necessidade de mão de obra e agilizar as avaliações, tornando o processo mais eficiente (MASUKA *et al.*, 2017; CONFALONIERI *et al.*, 2016).

O avanço do ganho genético em um programa de melhoramento pode ser impulsionado de diversas maneiras, como ampliar o tamanho do programa para aumentar a intensidade da seleção, melhorar a precisão da seleção, garantir a presença de variabilidade genética, acelerar os ciclos de reprodução, aprimorar as ferramentas de apoio à tomada de decisões e caracterizar

os materiais promissores para recomendação na fase final do programa de melhoramento. Em todos esses aspectos, a fenotipagem de alto rendimento demonstra aplicações específicas.

As medições manuais são subjetivas, suscetíveis a erros e não garantem repetibilidade. Reduzir o erro e a subjetividade com custos menores seria economicamente vantajoso para os programas de melhoramento. Além disso, as avaliações visuais podem não capturar adequadamente a variabilidade fisiológica das plantas (KHAN; KORBAN, 2022). Aprimorar as ferramentas de fenotipagem de alto rendimento é essencial para obter medidas quantitativas precisas das principais características, minimizando erros humanos ou ambientais, e aprimorando a seleção de materiais superiores.

Dessa forma, a melhoria das ferramentas de fenotipagem de alto rendimento utilizadas na cultura da soja, abrangendo diferentes fases de um programa de melhoramento - desde a geração de populações segregantes até a recomendação de linhagens nos ensaios de valor de cultivo e uso - representa uma estratégia crucial para acelerar as etapas do processo, ampliar o tamanho e a quantidade de populações avaliadas, aumentar a precisão da seleção e recomendação, além de otimizar os recursos disponíveis.

3. METODOLOGIA

3.1. Experimento

Os experimentos foram conduzidos no Centro de Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia (CDTT) da Universidade Federal de Lavras, em Ijaci, Minas Gerais, a 837 metros de altitude, latitude de $21^{\circ} 9'51.94''\text{S}$ e longitude de $44^{\circ}55'6.17''\text{O}$ (FIGURA 1). A região do experimento se enquadra na classificação climática Cwa, conforme Köppen (1948), sendo um clima quente, com inverno seco e verão quente.

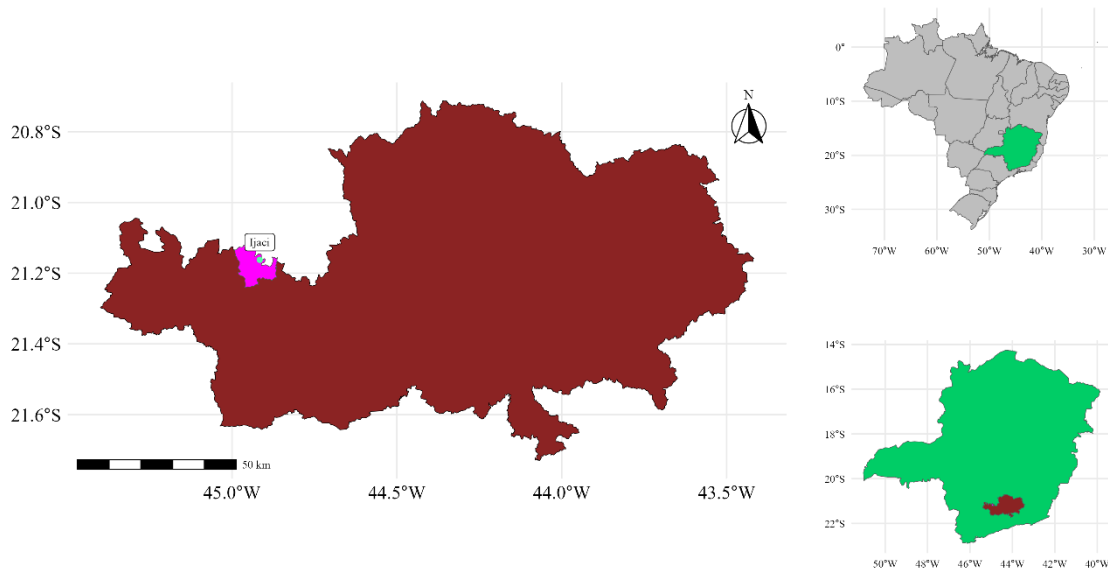


Figura 1 – Localização do Centro de Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia (CDTT) da Universidade Federal de Lavras em Ijaci. Universidade Federal de Lavras, Lavras - Minas Gerais, 2023.

Fonte: Do autor (2023).

As condições climáticas de temperatura máxima mínima e média e pluviosidade durante a condução do experimento estão apresentadas na figura dois. A pluviosidade acumulada durante a safra foi de 1213,44 milímetros (mm).

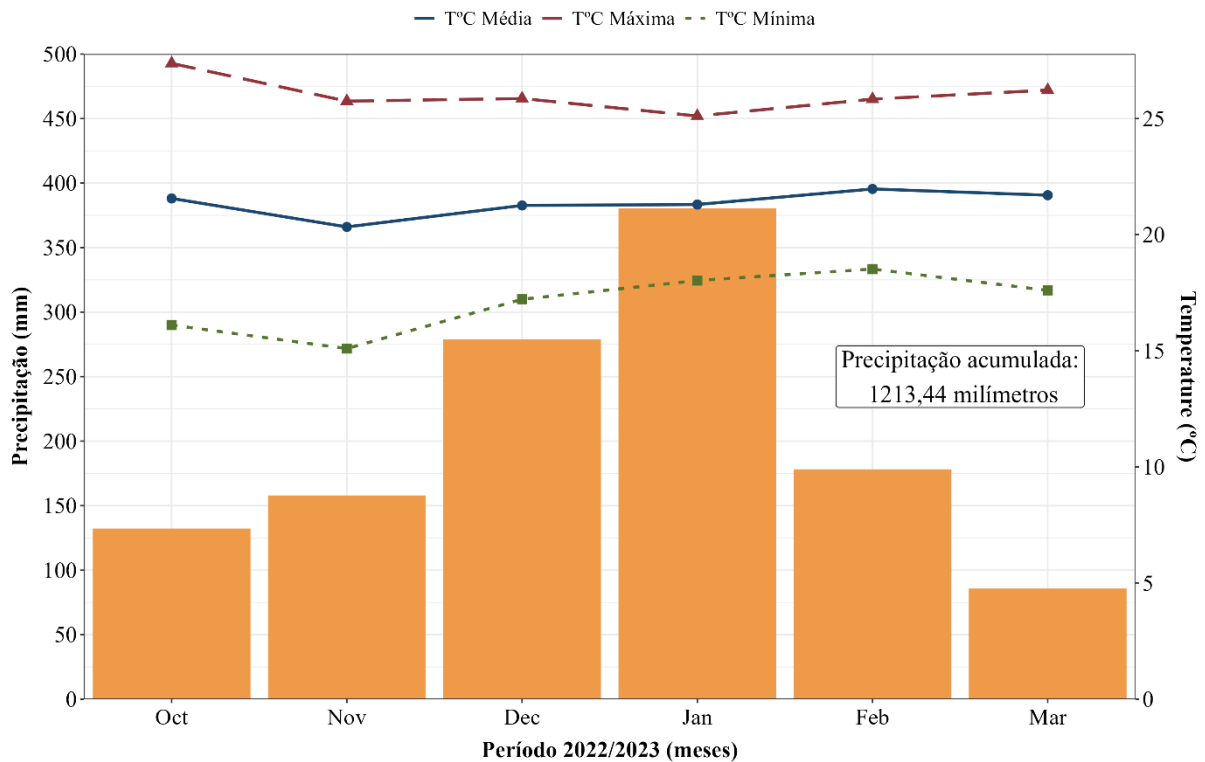


Figura 2 – Precipitação e temperatura máxima, mínima e média durante a condução do experimento. Universidade Federal de Lavras, Lavras - Minas Gerais, 2023.

Fonte: Do autor (2023).

Foram instalados três experimentos, em que cada qual correspondeu a uma época de semeadura, sendo realizados nas datas 14 de outubro, 01 e 16 de novembro de 2022, denominadas épocas A, B e C, respectivamente. O delineamento adotado foi em blocos completamente casualizados com três repetições. Os tratamentos foram organizados conforme o esquema de parcela subdividida 6 x 6 x 3 e repetições, totalizando 108 parcelas,

Os fatores que compreendem aos tratamentos foram:

- i. Cultivares: Foram analisadas três linhagens provenientes do programa de melhoramento genético da Universidade Federal de Lavras, sendo duas em fase de avaliação de Valor de Cultivo e Uso (VCU), designadas como VCU-9 que apresenta um grupo de maturação (GM) de 6.9, assim como a VCU-12, e a cultivar UFLA 6301RR que apresenta um GM de 6.3. Adicionalmente, três linhagens comerciais foram consideradas: 96R70 (GM = 6.7), 96R29 (GM = 6.2) e B5595CE (GM = 5.9).
- ii. Densidade populacional: foram avaliadas seis densidades populacionais, sendo adotadas 200, 240, 280, 320, 360 e 400 mil plantas por hectare. Estas densidades foram avaliadas para todas as cultivares.

Deste modo o experimento contemplou 108 parcelas e três épocas, totalizando 324 parcelas. A parcela experimental foi composta de quatro linhas, com espaçamento de 0,6 metros entre linhas e 5,5 metros de comprimento, correspondendo a 12,96 m², sendo que a área útil da parcela foi de 6,48 m².

Foi utilizado uma bordadura de 1,2 metros de área livre de ambos os lados da parcela em função da aplicação das técnicas de fenotipagem, visando a qualidade de obtenção das informações por voo, ao longo das diferentes fazes do ciclo de desenvolvimento da cultura.

3.2. Condução do experimento

Previamente, a semeadura, foi realizada análise de solo da área a fim de corrigir a fertilidade e calcular a adubação de base. A área foi dessecada sete dias antes da implantação dos experimentos. As sementes das seis linhagens foram tratadas com os produtos Vitavax® e Upseed® com uma dosagem de 3 ml/kg antes da semeadura.

A semeadura foi realizada de forma mecânica com o emprego de semeadora a disco de quatro linhas, em que as densidades foram ajustadas na semeadora em função da relação entre as catracas (motora e movida) e da velocidade de semeadura. Após a semeadura, foi feita a inoculação por pulverização, com auxílio de um pulverizador costal, de inoculante líquido comercial com as cepas bacterianas de *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5019 e SEMIA 5079, na dose de 300 mL/ha.

O manejo de plantas daninhas foi realizado conforme a pressão de infestação. O manejo de pragas e doenças foi realizado com base na necessidade, a partir do monitoramento e detecção do nível de controle. Na adubação de base foi utilizado 240 kg.ha⁻¹ de MAP (11-52-00), aplicado no sulco de semeadura. Os demais tratamentos culturais foram realizados de acordo com a necessidade da cultura, empregando procedimento semelhante ao relato por Soares *et al.* (2020).

A colheita das parcelas foi realizada de forma manual na área útil que corresponde as duas linhas centrais, sendo cortadas, trilhadas e retiradas as impurezas para em seguida aferir a umidade e peso na colheita.

3.3. Variáveis analisadas

Os seguintes caracteres foram avaliados durante a condução do experimento:

- i. Altura de plantas: foi realizada semanalmente em três plantas após a emergência da cultura, com auxílio de uma régua graduada conforme Martins *et al.* (1999).
- ii. Diâmetro de copa: foi realizada semanalmente em três plantas após a emergência da cultura, medindo a maior distância longitudinal da planta de soja, no sentido da linha e no sentido da entre linha.
- iii. Número de grãos por planta: foi realizada a amostragem de três plantas por parcela em que o número de grãos foi contado e então calculada a média.
- iv. Número de vagens por planta: foi realizada a amostragem de três plantas por parcela em que o número de vagens foi contado e então calculada a média.
- v. Número de hastes por planta: foi realizada a amostragem de três plantas por parcela em que o número de hastes foi contado e então calculada a média.
- vi. Produtividade de grãos: foi mensurada convertendo a produção da área útil da parcela em produtividade por hectare e foi ajustada para 13% de umidade.

3.4. Fenotipagem de alto rendimento

A fenotipagem de alto rendimento foi realizada utilizando uma RPA Phantom 4 equipado com um sensor RGB. Este sensor captura os comprimentos de onda nas faixas de azul (B), que varia de 440 a 495 nm, verde (G), com variação entre 495 e 570 nm, e vermelho (R), cujos comprimentos de onda variam de 620 a 750 nm. Os voos foram realizados semanalmente a uma altura de 30 metros, entre 10:00h e 13:00h para evitar sombreamento e aproveitar os ângulos dos raios solares a fim de capturar as informações em todos os estádios vegetativos e reprodutivos de cada cultivar e isolar o efeito ambiental, sendo a variação observada inerente a cultura.

Os planos de voos foram elaborados com o Pix4D capture e foi adotada uma sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 70%. Foram adicionados 12 pontos de controle na área de voo, devidamente georreferenciados com GNSS RTK para ancorar os mapas e ter uma sobreposição precisa durante a confecção dos ortomosaicos sequenciais, em que para a elaboração dos mesmos foi utilizado o software Agisoft PhotoScan (AGISOFT, 2018 versão gratuita de avaliação).

Foram realizados cinco voos de modo a avaliar os estádios fenológicos V5, R1, R3, R5 e R7. A análise do mosaico foi realizada utilizando o software QGIS (QGIS Development Team, 2023). Inicialmente procedeu-se com o recorte da área experimental, e em seguida o índice de Folha Verde (GLI). (EQUAÇÃO 1).

(1)

$$GLI = \frac{(G - R) + (G - B)}{(2 * G) + R + B}$$

Com auxílio do plugin LFtools (FRANÇA, 2021) foi realizada a segmentação do solo presente no mosaico, tendo a informação de cobertura vegetal do índice GLI como referência. Após esta etapa, foi então realizada a contagem da quantidade de pixels por parcela dentro da área útil, correspondendo então a cobertura vegetal.

3.5. Análise dos dados

Os experimentos foram inicialmente, analisados individualmente pelo modelo apresentado na equação 2 para a variável analisada, a fim de captar todo o ruído ambiental presente nos dados.

(2)

$$\bar{y} = \mu + X_r \tau_r + X_g \tau_g + X_{rg} u_{rg} + X_d \tau_d + X_{gd} \tau_{gd} + \varepsilon$$

em que:

\bar{y} : Valor observado para a característica analisada;

μ : constante associada a todas as observações;

$X_r u_r$: vetor dos efeitos fixos de repetição;

$X_g \tau_g$: vetor dos efeitos fixos de cultivar;

$X_{rg} u_{rg}$: vetor do efeito de interação tratamento x repetição (aleatório), $gr \sim N(0, \sigma_{gr}^2)$;

$X_d \tau_d$: vetor dos efeitos fixos de densidade;

$X_{gd} \tau_{gd}$: vetor dos efeitos fixos de interação cultivar x densidade;

ε : vetor do efeito de erros associados (aleatório), $\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$.

A precisão experimental foi aferida por meio da estimativa do coeficiente de variação (CV) de acordo com o estimador apresentado na equação 3.

(3)

$$CV(\%) = \frac{\sigma_e}{\bar{X}} * 100$$

em que:

$CV(\%)$: é o coeficiente de variação expresso em porcentagem;

σ_e : é o desvio do erro;

\bar{X} : é a média da característica em análise.

Para verificar a eficiência da estimativa da cobertura vegetal estimada pela fenotipagem de alto rendimento, foi estimada a correlação de Pearson entre as medições manuais e a cobertura do dossel estimada com base na contagem de pixels.

Após o ajuste dos dados, foi então realizada a estimativa do coeficiente de regressão polinomial de ordem dois para a cobertura do dossel das plantas estimada com imagens aéreas de modo a compreender o comportamento das cultivares nas diferentes densidades nas diferentes épocas de semeadura. (EQUAÇÃO 4)

(4)

$$y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 x_{ij} + \beta_2 x_{ij}^2 + e_{ij}$$

em que:

y_{ijk} : variável resposta para o genótipo i na densidade j ;

x_i : efeito da variável independente, x , na observação i , $i = 1, \dots, n$ (não aleatória);

β_0, β_1 e β_2 : correspondem aos parâmetros do modelo;

e_{ij} : erro aleatório associado ao modelo;

Também foram estimadas a correlação fenotípica entre as variáveis analisadas, equação 5. Os coeficientes foram testados com base no teste t ao nível de 0,01 e 0,05 de significância.

(5)

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sqrt{(\sigma_x^2 * \sigma_y^2)}}$$

em que:

ρ_{xy} : correlação entre as variáveis x e y ;

σ_{xy} : covariância entre as variáveis x e y ;

σ_x^2 : variância da variável x ;

σ_y^2 : variância da variável y ;

Todas as etapas de análise foram realizadas no ambiente R (R Core Team 2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 é apresentado o quadrado médio (QM) para os fatores ajustados no modelo. Verifica-se que existe efeito significativo para os efeitos de cultivar e densidade independente

da época de semeadura, porém, a interação, para a época B, foi não significativo, indicando independência para estes fatores.

Tabela 2 - Resumo da análise de variância para a variável produtividade de grãos.

FV	QM		
	Época A	Época B	Época C
Cultivar	33240801,39*	10499478,15*	2158816,66*
Densidade	9649212,49*	8449410,68*	7267978,05*
Tratamento: Densidade	957586,31*	853977,29	868793,04*
CV1	15,95	14,45	15,48
CV2	12,60	18,71	17,41

* Significativo pelo teste *F* ao nível de 0,05 de significância.

Em um estudo relacionado, Mattos et al. (2020) identificaram interação significativa ($P < 0,01$) de acordo com o teste *F* para produtividade de grãos avaliando a performance de genótipos de soja em diferentes épocas de semeadura corroborando os resultados obtidos no presente estudo. Os valores obtidos para o coeficiente de variação foram inferiores a 19%, que segundo Pimentel (2009), podem ser classificados como de alta precisão.

Na época A, foi possível identificar que a linhagem VCU-9, produziu 8000 Kg/ha em duas densidades distintas, 320 e 400 mil plantas/hectare (Figura 3). Além disso, também é possível verificar uma produtividade destacada para a linhagem VCU-12, apresentando produtividade próxima à 8000 Kg/ha na densidade de 320 mil plantas/ha. De maneira análoga, considerando a densidade de 400 mil plantas/ha, a produtividade estimada pode atingir mais de 8000 Kg/ha.

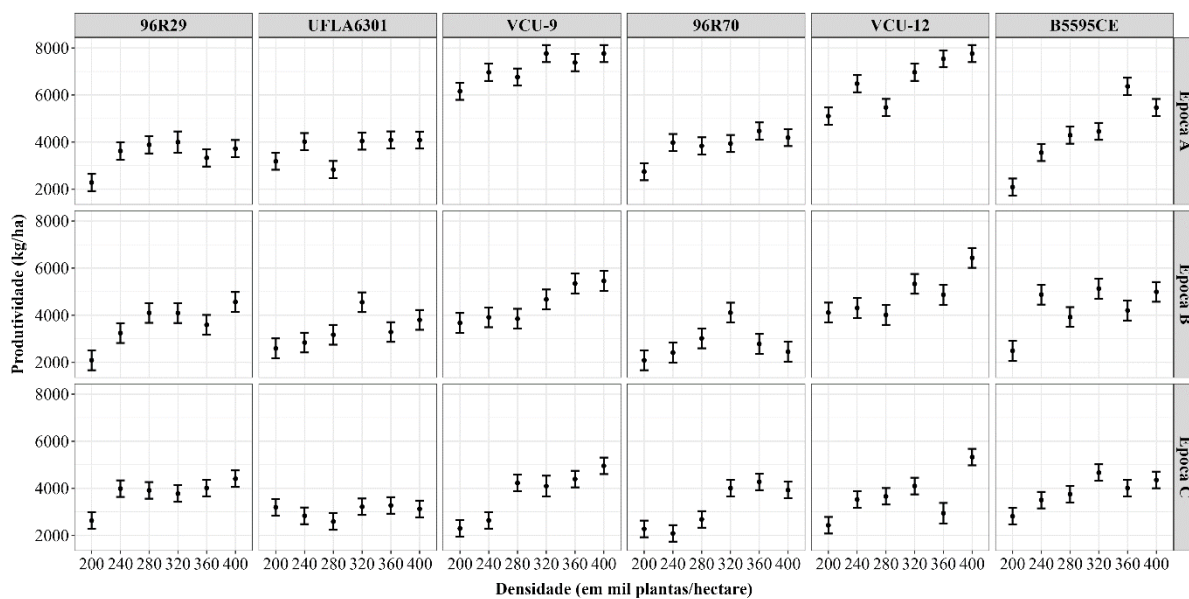


Figura 3 - Médias ajustadas para produtividade de grãos em quilos por hectare das diferentes cultivares de soja sob diferentes densidades de plantio em diferentes épocas de semeadura estimada por imagens digitais aéreas.

Outra informação que merece destaque é que as linhagens VCU-9 e VCU-12 não obtiveram produtividade menor que 5000 Kg/ha em nenhuma das densidades, o que evidencia uma excelente plasticidade fenotípica. Em relação as menores produtividades, verifica-se um comportamento semelhante entre as cultivares 96R29, UFLA6301, e 96R70, com baixo incremento em produtividade à medida que se eleva a densidade populacional. A cultivar B5595CE apresentou uma ótima resposta produtiva até a densidade de 360 mil plantas/hectare.

Um fator importante a se destacar é que a região do Campo das Vertentes está fora das macrorregiões padrões para a recomendação de cultivares de soja. Esta região é caracterizada por ser uma região de alta altitude e, para um germoplasma desenvolvido nestas condições, espera-se uma resposta diferencial em rendimento, e de estabilidade ao longo das locais do ambiente (ROCHA, 2002).

Na época B, observa-se uma redução na magnitude dos valores médios para as combinações dos fatores época de plantio, sobretudo nas densidades de 320 e 400 mil plantas/ha. Verifica-se uma redução média na produtividade das linhagens VCU-9 e VCU-12 de aproximadamente 3000 Kg/ha, denotando uma forte interação entre a época de semeadura e cultivares.

Para o efeito de densidade entre as épocas A e B, para as cultivares VCU-9, VCU-12, UFLA6301 e 96R29, a variação mais expressiva foi com relação a magnitude da produtividade, entretanto para a cultivar 96R70 verifica-se que existe um efeito negativo a partir de 320 mil

plantas/hectare, indicando que este material não deve ser recomendado nestas condições, dado que a região está situada a uma altitude superior a 900 metros, é recomendável reduzir a densidade de sementeira à medida que a altitude aumenta. Já a cultivar B5595CE apresentou instabilidade produtiva à medida que se ultrapassa 240 mil plantas/hectare.

Conhecer a densidade de sementeira ótima para cada genótipo é fundamental para que se tenha economia durante a implantação da cultura. Carciochi et al. (2020) identificaram em seus estudos na América do Norte que existe a possibilidade de redução de até 24% na população de plantas sem alterar a produtividade, que corresponde a 238 mil plantas/hectare, fato este não observado neste estudo, pois cada linhagem apresenta um comportamento específico em resposta a alteração de densidades de sementeira.

Destarte, a época C, verificou-se um teto produtivo de aproximadamente 5300 kg/hectare, evidenciado pela linhagem VCU-12 na densidade de 400 mil plantas por hectare. Este resultado evidencia a importância da identificação de linhagens com ampla adaptação a janela de sementeira e que respondam significativamente a densidade adotada, uma vez que em condições adversas que inviabilizem a sementeira no momento ideal, não inviabilizem a obtenção de rentabilidade com a cultura (KAVA, 2017).

De mesmo modo, também se percebe altos rendimentos com a linhagem VCU-9, que atingiu seu máximo de produtividade chegando aos 5000 Kg/ha na maior densidade de sementeira. Por outro lado, as demais cultivares, 96R29, UFLA 6301RR, 96R70 e cultivar B5595CE não ultrapassaram 4500 Kg/ha, com comportamento semelhante as demais épocas e densidade de sementeira.

Balena et al. (2016) e Mattos et al. (2020), identificaram redução na produtividade média de grãos à medida que se postergue a janela ideal de sementeira específica para cada região produtora. Corroborando os resultados obtidos no presente estudo.

Em plantas que apresentam plasticidade fenotípica como a soja, é esperado que alterações no ambiente de cultivo resultem em alterações na morfologia da planta nos diferentes estádios vegetativos. Desta forma, variações com relação à altura das plantas podem ser observadas à medida que se altera a densidade de sementeira (BÜCHLING *et al.* 2017).

As cultivares 96R29, 96R70, B5595CE e UFLA6301 apresentaram altura máxima em R7, acima de 100 cm, enquanto VCU-9 e VCU-12 apresentam valores abaixo deste ponto, independente da densidade, conforme modelos de regressão polinomial de ordem dois, ajustados na figura 4. Estes genótipos de menor estatura, coincidentemente foram os aqueles que apresentaram o maior incremento em produtividade à medida que se alterou as densidades de sementeira.

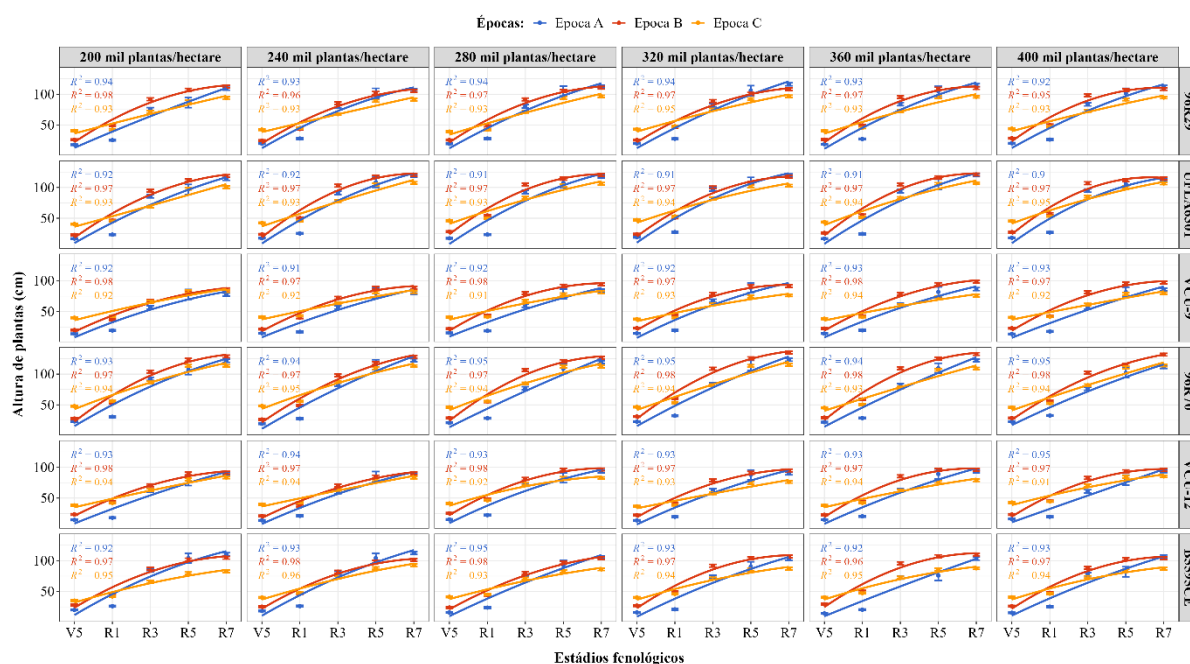


Figura 4 - Médias ajustadas para altura das diferentes cultivares de soja sob diferentes densidades de plantio em diferentes épocas de semeadura estimada por imagens digitais aéreas.

Balbinot et al. (2018) destacam a importância da plasticidade fenotípica como uma característica fundamental para a adaptação de plantas a ambientes diversos. A observação de que as linhagens VCU-9 e VCU-12 demonstram excelente plasticidade ao manterem produtividades acima de 5000 Kg/ha em todas as densidades populacionais da época A corrobora a relevância dessas características na resposta adaptativa das culturas.

No que tange à influência da densidade populacional, Petter et al. (2016) avaliaram a resposta da soja a diferentes densidades, demonstrando que a variação nas produtividades das linhagens em relação às densidades populacionais, conforme observado nesta pesquisa, ressalta a necessidade de ajustar estrategicamente a densidade de semeadura, considerando as especificidades genéticas de cada cultivar.

Tendo em relação a peculiaridade da região do Campo das Vertentes, para a recomendação de cultivares de soja, pode se contextualizar os fatores geográficos e climáticos. Neste âmbito o Reynaldo et al. (2016) exploram a influência da altitude e outros fatores geográficos na produtividade da soja, fornecendo um contexto mais aprofundado sobre a adaptação de cultivares a condições geográficas particulares.

Desse modo, ao discutir a interação entre época de semeadura e cultivares, Meotti et al. (2012) apresentam uma abordagem importante sobre a escolha adequada da época de

semeadura para otimizar o rendimento da soja. Homólogo a isso, a observação de uma redução na produtividade para as linhagens VCU-9 e VCU-12 na época C ressalta a sensibilidade dessas cultivares à época de semeadura, enfatizando a necessidade de considerar cuidadosamente a sincronização entre genótipo e ambiente.

No estágio vegetativo V5, as diferentes cultivares, independente do efeito de densidade apresentaram um comportamento semelhante, isto é, todos os genótipos apresentam maior altura na época B, seguidos pela época C e os menores valores observados quando a semeadura foi realizada no início da janela de plantio.

A partir do estágio R1, a época B apresentou o maior incremento de altura até o estágio R7, com uma curva de natureza polinomial, assim como para época C. A época A apresentou comportamento linear para incremento em altura, conforme a alteração dos estádios fenológicos das diferentes cultivares.

Ao final do ciclo, em R7, a época C apresentou os menores valores de altura independente da combinação dos fatores em avaliação. Contudo, foi notada uma variação negativa para a cultivar B5594CE. Já para as épocas A e B, o comportamento apresenta baixa variação.

Destarte, as linhagens VCU-9 e VCU-12 apresentaram o menor incremento em relação às alturas, independentemente das densidades de semeadura, com menor desenvolvimento na época C, não ultrapassando 100 cm de altura. Estas cultivares apresentam alto desempenho produtivo, o que evidencia uma relação inversa entre as variáveis produtividade e altura de plantas.

A respeito da largura de plantas, as avaliações foram realizadas até o fechamento das linhas. Para a época A, verifica-se que o fechamento apenas ocorreu em R3, diferentemente das demais cultivares que completaram o fechamento da linha em R1. Esta época também permitiu uma maior altura de plantas, ou seja, semeadura no início da janela de tendem a ter plantas com maiores incrementos em altura e maior tempo para fechamento de linha, o que implica diretamente no manejo da cultura, com relação a presença de plantas daninhas (RAFAIN, et al. 2020) (Figura 5).

A plasticidade fenotípica em plantas, é um fenômeno observado na soja, representa uma resposta adaptativa que reflete a habilidade das plantas em ajustar suas características morfológicas em conformidade com variações ambientais. Dessa maneira, o estudo de Nicotra et al. (2010) e Sultan (2000) enfatizam a importância adaptativa dessa plasticidade, ressaltando o papel crucial das plantas em otimizar seu desempenho em face de condições ambientais dinâmicas.

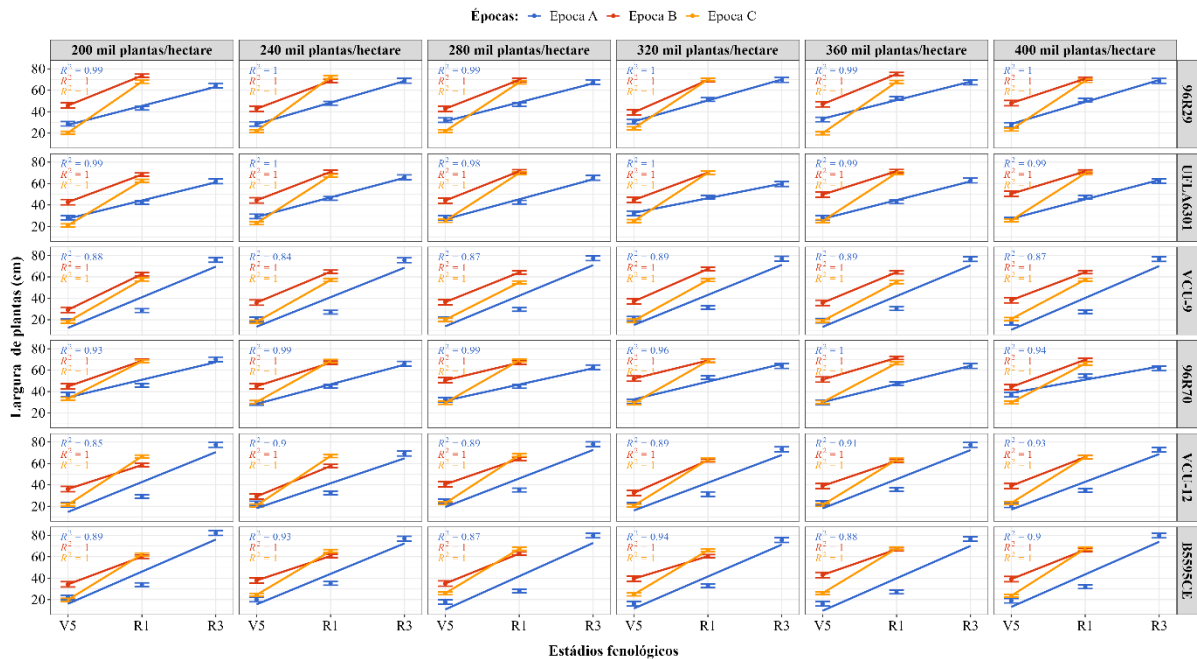


Figura 5 - Médias ajustadas para largura das diferentes cultivares de soja sob diferentes densidades de plantio em diferentes épocas de semeadura estimada por imagens digitais aéreas.

De mesmo modo, no âmbito das cultivares específicas de soja, um estudo realizado por Ferrari et al. (2008) ressaltaram a importância da compreensão dos mecanismos de resposta dessas plantas a fatores como densidade de semeadura e fotoperíodo. Esses estudos evidenciam a necessidade premente de incorporar considerações relacionadas à plasticidade fenotípica ao avaliar o crescimento e desenvolvimento das cultivares, particularmente em distintos estágios fenológicos.

Além disso, um estudo realizado por Wasson et al. (2014) destaca que características morfológicas, notadamente a altura, exercem uma influência direta sobre o rendimento da cultura. Contudo, Ainsworth et al. (2012) advertem sobre a complexidade inerente a essa relação, salientando a necessidade de considerar as interações genótipo-ambiente para uma interpretação mais acurada.

Dessa forma, na avaliação das cultivares de soja em diferentes densidades de semeadura, torna-se imperativo adotar uma abordagem holística para a compreensão das respostas fenotípicas.

No Estádio vegetativo V5, é possível identificar que a semeadura na época B apresentou maiores valores de largura de plantas em relação as demais. Desta forma, é esperado que se observe maior biomassa verde nas diferentes cultivares a qual pode resultar em vantagens competitivas e de produtividade para estas plantas. Esta variação em relação ao tempo para o fechamento de linha por diferentes cultivares sob influência de diferentes fatores pode ser

estimada de forma indireta por imagens aéreas obtidas por RPA. Vale ressaltar que esta cobertura do dossel é estimada em função da presença de biomassa nas plantas de soja, modelando também o efeito de senescência e queda de folhas após a maturidade fisiológica.

Na figura 6 é apresentado o resultado da cobertura de dossel das diferentes cultivares sob as diferentes épocas de semeadura e densidades, estimadas a partir de imagens aéreas. A cobertura do dossel estimada na área útil da parcela permite observar que, apesar de a partir de R3 todas as cultivares apresentarem fechamento de linha, nem toda a superfície é preenchida por material vegetal, evidenciado pela menor contagem de pixels da época A com relação as demais épocas.

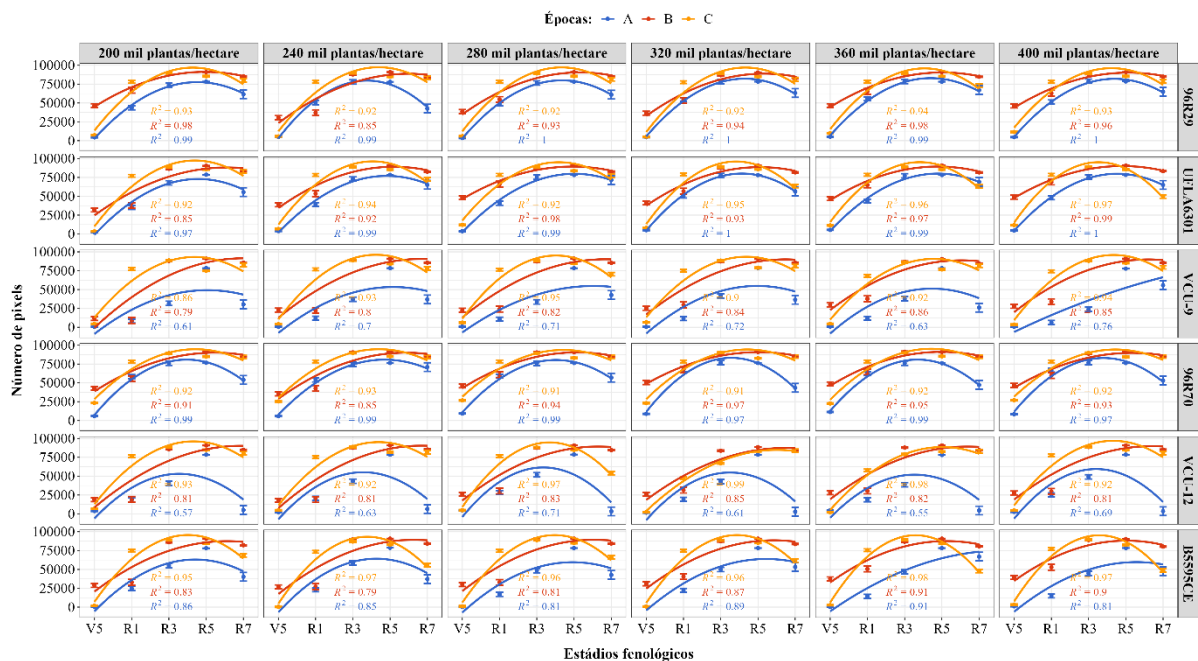


Figura 6 - Médias ajustadas para cobertura do dossel de diferentes cultivares de soja sob diferentes densidades de plantio me diferentes épocas de semeadura estimada por imagens digitais aéreas.

Dessa forma, a época de semeadura tem sido objeto de considerável atenção em pesquisas recentes. Estudos como os conduzidos por Zimmermann et al. (2023) destacam a relevância crucial do momento ideal de semeadura na determinação da produtividade da soja. A observação de que a época A, caracterizada pelo fechamento da linha em R3, permitiu uma maior altura de plantas sinaliza diretamente para a importância do tempo disponível para o desenvolvimento vegetativo.

A relação entre a largura de plantas, particularmente evidente na época B no estágio vegetativo V5, e a biomassa verde é um aspecto relevante a ser considerado. De mesmo modo, estudos de autores como Perissato (2019) reforçam a ideia de que uma maior biomassa verde

está associada a vantagens competitivas, influenciando positivamente a produtividade das plantas de soja.

Adicionalmente, a implementação da tecnologia de aeronaves não tripuladas (RPA) para a estimativa indireta do tempo de fechamento de linha e cobertura do dossel constitui uma abordagem eficaz que requer menor intervenção manual. Homólogo a isso, um estudo de Schirrmann et al. (2016) explora o potencial dessas tecnologias para monitorar parâmetros agrônômicos, sublinhando a importância da precisão e da frequência das medições.

Destarte, a análise desses resultados estabelece uma base sólida para a compreensão das complexas interações entre época de semeadura, largura de plantas e biomassa verde na cultura de soja, oferecendo valiosas recomendações para o refinamento das práticas de manejo e a maximização da produtividade agrícola.

A época C apresentou picos de cobertura vegetal em R3 para todas as condições avaliadas, indicando que apesar do fechamento de linha ter sido identificado em R1, a máxima expansão e cobertura foliar é atingida em R3. Esta maior capacidade de desenvolvimento lateral do dossel das plantas permite maior competição das plantas na entrelinha e maior exploração da energia luminosa, uma vez que este plantio é realizado no final da janela de cultivo, dessa forma, se espera que se tenha condições desfavoráveis a cultura, o que desencadeia processos de plasticidade fenotípica em resposta a estas variações.

A linhagem VCU-12, no que diz respeito à época A, percebe-se uma desfolha mais intensa próximo a sua maturação. Esse comportamento demonstrado foi observado pois a variação de grupo de maturidade deste genótipo com relação aos demais levou a senescência mais acelerada no final de ciclo, desta forma, a contagem realizada identificou em sua maioria a presença de hastes sem folhas, o que ocasionou a variação observada, a qual merece atenção com relação a aplicação de técnicas de fenotipagem, indicando que cada genótipo apresenta um comportamento único e para que se tenha medidas de comparação eficientes, estes devem ser avaliados de forma individualizada.

Além disso, a maioria das linhagens na época B apresentaram uma maior cobertura do dossel já no estágio V5, estágio esse que foi marcado pelo início dos voos com o drone. Essa característica nos mostra que na época B as linhagens apresentam um incremento de biomassa mais acelerado em estádios de desenvolvimento iniciais (Figura 6).

Dessa maneira, um estudo apresentado por Rocha et al. (2018) revela uma análise detalhada da cobertura de dossel de diferentes cultivares em diversas épocas de semeadura e densidades, utilizando imagens aéreas para estimativas precisas. A observação de que, a partir do estágio R3, todas as cultivares apresentam fechamento de linha, mas nem toda a superfície

é preenchida por material vegetal, destaca a importância de avaliar não apenas o fechamento de linha, mas também a distribuição efetiva da biomassa vegetal na área útil da parcela.

A diferenciação na contagem de pixels entre as épocas A e as demais sugere variações na expansão e cobertura foliar ao longo do ciclo de crescimento. O destaque para a época C, com picos de cobertura vegetal em R3, aponta para a máxima expansão e cobertura foliar nesse estágio. Essa capacidade de desenvolvimento lateral do dossel influencia a competição das plantas na entrelinha e otimiza a captura de energia luminosa, sendo particularmente crucial em plantios realizados no final da janela de cultivo, onde as condições desfavoráveis podem desencadear processos de plasticidade fenotípica.

A observação de desfolha mais intensa próximo à maturação na linhagem VCU-12 durante a época A ressalta a importância de considerar as características específicas de cada genótipo. Essa senescência mais acelerada no final do ciclo pode influenciar a interpretação dos resultados, destacando a necessidade de abordagens individualizadas na fenotipagem. Dessa forma, essa observação está em conformidade com a literatura que destaca a variabilidade genotípica em respostas fenotípicas, especialmente em estágios tardios do ciclo de desenvolvimento da cultura (ELMERICH et al., 2023).

A identificação de maior cobertura do dossel nas linhagens durante a época B, já no estágio V5, sugere um incremento mais acelerado de biomassa em estágios iniciais de desenvolvimento. Esse achado é congruente com estudos que demonstram a importância do estágio V5 no acúmulo de biomassa e seu impacto na produtividade final (ANDRADE et al., 2005). Sendo assim, a utilização de imagens aéreas no estágio V5 para avaliar a cobertura do dossel destaca a eficácia dessa abordagem para monitorar o desenvolvimento inicial da cultura.

De maneira sumária, os resultados apresentados indicam a complexidade da dinâmica de crescimento das diferentes cultivares em resposta a épocas e densidades de semeadura. A análise individualizada de genótipos, considerando suas características fenotípicas específicas, é crucial para uma interpretação precisa dos dados. Esta complexa rede de interação entre os fatores analisados pode ser observado na figura 7, na qual os coeficientes de correlação fenotípica são apresentados.

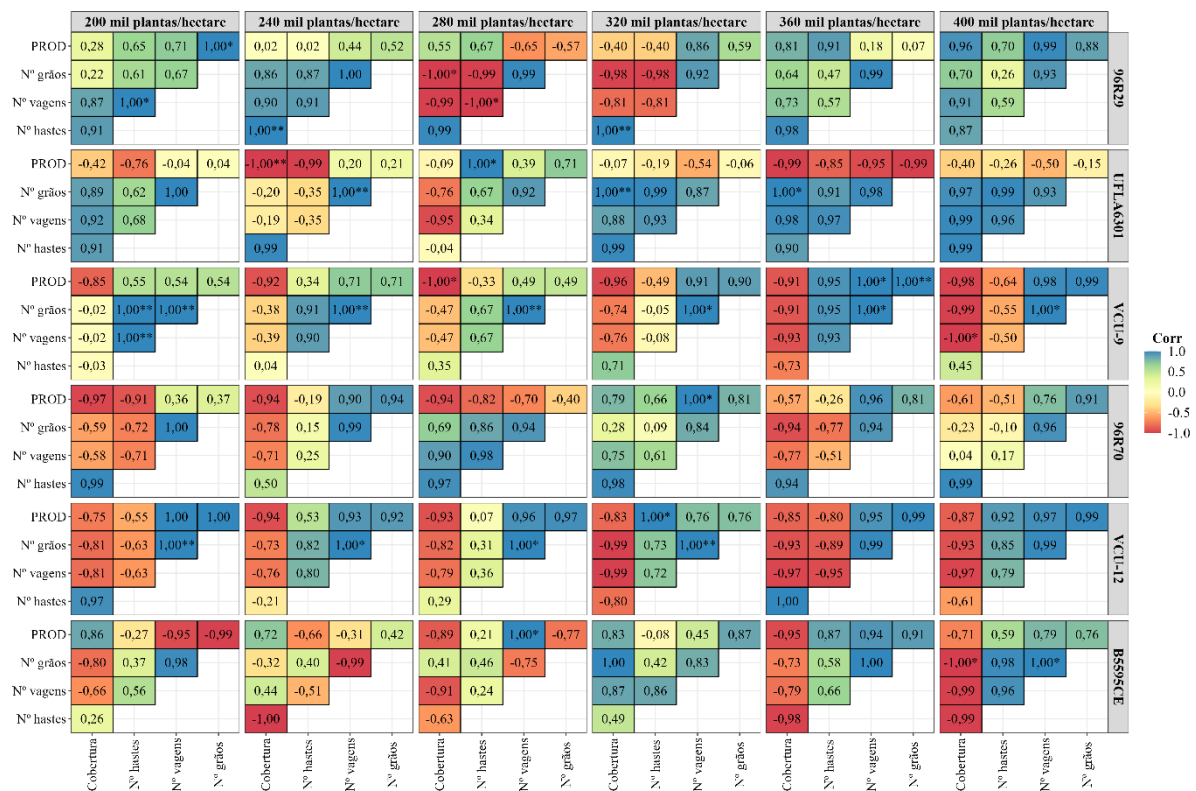


Figura 7 - Correlação de Pearson entre as variáveis analisadas para as diferentes cultivares em diferentes densidades de semeadura.

* **Significativo ao nível de 0.05 e 0,01, respectivamente.

Em relação a cultivar 96R29, verifica-se correlação positiva para todas as variáveis para as densidades de 200, 240, 360 e 400 mil plantas/ha. Para as densidades de 280 e 320 mil plantas/ha correlação negativa foi observada para números de grão, vagens e hastes, além de cobertura vegetal e produtividade com cobertura e número de hastes para 320 mil plantas/há.

Correlações significativas foram observadas entre cobertura e número de hastes para 240 e 320 mil plantas/ha e com 200 mil plantas/ha para produtividade e número de grãos, assim como para número de hastes e número de vagens, o que indica para esta cultivar com menor densidade propicia maior engalhamento e consequentemente um incremento nos componentes de produção e resposta em produtividade.

Já em relação a cultivar UFLA6301 percebe-se uma alta correlação entre número de grãos e número de vagens para todas as densidades. Para a maioria das densidades, produtividade de grãos apresentou uma baixa relação com as demais variáveis número de grãos para as densidades até 280 mil plantas/ha e número de vagens em 240 mil plantas/ha. Em 280 mil plantas/ha, alta correlação entre produtividade e número de hastes. Para as demais variáveis se observa relação positiva, com exceção das densidades de 240 e 280 mil plantas/ha.

A respeito da cultivar VCU-9 nota-se que em todas as densidades de semeadura houve correlação de 1,00 entre número de grãos e número de vagens. Ademais, nas densidades de 360 e 400 mil plantas/ha houve grande significância entre produtividade, número de vagens e de grãos ($>0,98$). Para esta linhagem, não foi observada relação positiva entre a cobertura do dossel e as demais variáveis analisadas. Indicando que a arquitetura do dossel do material não corresponde a sua resposta produtiva.

No que tange a cultivar 96R70 percebe-se maior correlação entre número de grãos e número de vagens para todas as densidades de semeadura analisadas. Além disso, nas densidades de 200, 280, 320, 360 e 400 mil plantas/ha houve grande correlação entre o número de hastes e a cobertura do dossel ($>0,94$).

Sobre a cultivar VCU-12 é possível identificar significância entre número de grãos e número de vagens em todas as densidades de semeadura analisadas ($>0,99$). No entanto, baixa correlação entre produtividade, número de grãos, número de vagens e cobertura do dossel.

Destarte, no que diz respeito a cultivar B5595CE, também é possível notar que houve grande correlação entre número de grãos e número de vagens ($>0,98$), com exceção da densidade de 240 mil plantas/ha. Acima de 360 mil plantas/ha, não foi identificada associação positiva entre cobertura do dossel e as demais variáveis. Isso evidencia que a partir desta densidade esta linhagem tende a vegetar mais e perder em capacidade produtiva.

5. CONCLUSÃO

A escolha da época e da densidade de semeadura tem impacto significativo na produtividade de linhagens no Campo das Vertentes. As linhagens VCU-9 e VCU-12 demonstram-se promissoras. Em geral, a plasticidade fenotípica das linhagens avaliadas apresentou grande variabilidade entre as densidades, o que indica que cada linhagem tem um comportamento específico para as combinações destes fatores, devendo então ser analisados de forma pontual.

Para cobertura do dossel, os resultados destacam uma interação específica das linhagens nas diferentes épocas de semeadura, entretanto, em virtude da identificação de um efeito não linear entre as densidades de semeadura nas diferentes épocas, não foi possível identificar uma relação direta da contagem de pixels com a cobertura do dossel das linhagens estudadas.

REFERÊNCIAS

- AASEN, H. et al. PhenoCams for field phenotyping: using very high temporal resolution digital repeated photography to investigate interactions of growth, phenology, and harvest traits. **Frontiers in plant science**, v. 11, p. 593, 2020.
- AGISOFT LLC. Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.5, 2018.
- AINSWORTH, Elizabeth A. et al. Accelerating yield potential in soybean: potential targets for biotechnological improvement. **Plant, cell & environment**, v. 35, n. 1, p. 38-52, 2012.
- ANDRADE, Fernando H.; ABBATE, Pablo E. Response of maize and soybean to variability in stand uniformity. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 4, p. 1263-1269, 2005.
- ANDRADE, S. M.; TEODORO, L. P. R.; BAILO, F. H. R.; CAMPOS, C. N. S.; ROQUE, C. G.; SILVA JÚNIOR, C. A. da; CORADI, P. C.; TEODORO, P. E. High-throughput phenotyping of soybean genotypes under base saturation stress conditions. **Journal Of Agronomy And Crop Science**, v. 207, n. 5, p. 814-822, 6 jun. 2021.
- ARAÚJO, G. P.; NETO, F. C. V.; MASCENA, A. M.; FREIRE, E. C.; MORELLO, C. L.; SUINAGA, F.; FILHO, J. L. S e SANTOS, J. W. **Valor de cultivo e uso de cultivares e linhagens de algodão herbáceo**. EMBRAPA, 2004.
- ARAUS, J. L.; KEFAUVER, S. C.; ZAMAN-ALLAH, M.; OLSEN, M. S.; CAIRNS, J. E. Translating High-Throughput Phenotyping into Genetic Gain. **Trends In Plant Science**, v. 23, n. 5, p. 451-466, May 2018.
- BAI, G. et al. A multi-sensor system for high throughput field phenotyping in soybean and wheat breeding. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 128, p. 181-192, 2016.
- BALENA, R.; GIACOMINI, C. T.; BENDER, A. C.; NESI, C. N. Época de semeadura e espaçamentos entre linhas na produtividade da soja. **Unoesc & Ciência-ACBS**, Joaçaba, v. 7, n. 1, p. 61-68, 2016.
- BALBINOT JUNIOR, A. A.; PROCOPIO, S. D. O.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, **Densidade de plantas na cultura da soja**. Londrina; Embrapa, 2015, 38 p. Brasília: EMBRAPA-CNPSO, 38 p, 2015.
- BALBINOT JUNIOR, Alvadi Antonio et al. Phenotypic plasticity in a soybean cultivar with indeterminate growth type. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 1038-1044, 2018
- BARBOSA, M. **Uma abordagem para análise de dados com medidas repetidas utilizando modelos lineares mistos**. 2009. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Licenciatura em Matemática, Estatística e Experimentação Agrícola, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2009.
- BÜCHLING, Cristiano et al. Uso da plasticidade morfológica como estratégia para a redução da população de plantas em cultivares de soja. **Agrarian**, v. 10, n. 35, p. 22-30, 2017.

CÂMARA, G. M. S. Soja: tecnologia de produção. In: SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; A BOREM. **Soja do plantio à colheita**. Viçosa: UFV, 2015. p. 66-109.

CÂMARA, G. M. **Soja: tecnologia da produção**. Piracicaba: ESALQ/Departamento de Agricultura. 1998

CANAL RURAL. **Soja: produção em Minas Gerais deve crescer 15%**. Recuperado de <https://www.canalrural.com.br/noticias/agricultura/soja-producao-minas-gerais-deve-crescer-15/>, 2014.

CARCIOCHI, W. D.; SCHWALBERT, R.; ANDRADE, F. H.; C., G. M.; CARTER, P.; GASPAR, A. P.; SCHMIDT, J.; CIAMPITTI, I. A. Soybean Seed Yield Response to Plant Density by Yield Environment in North America. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 4, p. 1923-1932, jul. 2019.

CASAROLI, D.; FAGAN, E. B.; MEDEIROS, S. P.; MANFRON, P.A.; DOURADO NETO, D.; DE JONG VAN LIER, Q.; MÜLLER, L.; MARTIN. T. N. Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura de soja: uma revisão. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**, v. 14. n. 2, p. 102-120, 2007.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos - Safra 2022/23, Décimo Primeiro Levantamento**. Companhia Nacional de Abastecimento. Recuperado de <http://www.conab.gov.br/>, 2023.

CONFALONIERI, R. *et al.* A taxonomy-based approach to shed light on the babel of mathematical models for rice simulation. **Environmental Modelling & Software**, v. 85, p. 332-341, nov, 2016.

COOPERATIVE EXTENSION SERVICE AMES. How a soybean plant develops. **Ames: Iowa State University of Science and Technology**, 1994. 20 p.

CRUZ, S. C. S. *et al.* Cultivo de soja sob diferentes densidades de semeadura e arranjos espaciais. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 3, n. 1, p. 1-6, 2016.

DAROISH, M.; HASSAN, Z.; AHAD, M. Influence os planting dates and plant densities on photosynthesis capacity, grain and biological yield of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] in Karaj, Iran. **Journal of Agronomy**, v.4, n.3, p.230-237, 2005.

DE BRUIN, J. L.; PEDERSEN, P. 2008. Effect of row spacing and seeding rate on soybean yield. **Agronomy Journal**, Madison, v.100, n.3, p.704-710.

DEVLIN, D. L. *et al.* Row spacing and seeding rates for soybean in low and high yielding environments. **Journal of Production Agriculture**, v. 8, n. 2, p. 215-222, 1995.

DE BRUIN, J. L.; PEDERSEN, P. Effect of row spacing and seeding rate on soybean yield. **Agronomy journal**, v. 100, n. 3, p. 704-710, 2008.

DE OLIVEIRA, A. J. *et al.* Potencialidades da utilização de drones na agricultura de precisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 64140-64149, 2020.

- DIMA, D. C. Results on soybean time of sowing and distance between rows in Romania in the experimental years 2015 and 2016. **Scientific Papers**. Series A. Agronomy, v. 60, 2017.
- DUAN, L.; YANG, W.; HUANG, C.; LIU, Q. A novel machine-vision-based facility for the automatic evaluation of yield-related traits in rice. **Plant Methods**, v. 7, n. 44, p. 1-13, 2011.
- ELMERICH, Chloé et al. Envirotyping to control genotype x environment interactions for efficient soybean breeding. **Field Crops Research**, v. 303, p. 109113, 2023.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologia de Produção de soja** – Região Central do Brasil 2012 e 2013. Londrina, PR: Embrapa Soja 2011^a, 264 p, 2011.
- EMBRAPA SOJA **Tecnologias de produção de soja - Região central do Brasil 2004**. Londrina: Embrapa, 243 p. (Documento). Brasília: EMBRAPA-CNPSo, 243p, 2003.
- EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de produção de soja - Região central do Brasil 2014**. Londrina: Embrapa, 266 p. (Documento). Brasília: EMBRAPA-CNPSo, 2013. 266p.
- ESPERIDIÃO, T. L.; SANTOS, T. C.; AMARANTE, M. S. Agricultura 4.0: Software de Gerenciamento de Produção. Mogi das Cruzes: **Pesquisa e Ação V5 N4**, 2019.
- FARIAS, F. H. R. *et al.* **Estádios fenológicos da soja**. Circular Técnica 130. Embrapa Soja, 2018.
- FARIAS, F. H. R. *et al.* **Estádios fenológicos da soja**. Circular Técnica 130. Embrapa Soja, 2007.
- FARIAS, J. R. B.; ASSAD, E. D.; ALMEIDA, I. R.; EVANGELISTA, B. A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.
- FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Circular Técnica 48). Brasília: EMBRAPA-CNPSo, 9p, 2007.
- FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development. Special Report 87. Agricultural and Home Economics Experiment Station**, Iowa State University, 1997.
- FIETZ, C. R.; RANGEL, M. AS. Época de semeadura da soja para a região de Dourados-MS, com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 666-672, 2008.
- FIORANI, F.; SCHURR, U. Future Scenarios for Plant Phenotyping. **Annual Review Of Plant Biology**, v. 64, n. 1, p. 267-291, 29 abr. 2013.
- FLUMIGNAN, D. L.; ALMEIDA, A. C. S.; GARCIA, R. A. **Necessidade de irrigação complementar da soja na Região Sul de Mato Grosso do Sul**. Embrapa, Mato Grosso do Sul, set. 2005.

FRANÇA, L. **Tools for cartographic production, surveying, database management, digital image processing and spatial analysis**. 2021. Disponível em: <https://plugins.qgis.org/plugins/lftools/>.

GITELSON, A. A.; STARK, R.; GRITS, U.; RUNDQUIST, D.; KAUFMAN, Y.; DERRY, D. Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. **International Journal Of Remote Sensing**, v. 23, n. 13, p. 2537-2562, jan. 2002.

GOLZARIAN, M. R.; FRICK, R. A.; RAJENDRAN, K.; BERGER, B.; ROY, S.; TESTER, M.; LUN, D. S. Accurate inference of shoot biomass from high-throughput images of cereal plants. **Plant Methods**, v. 7, n. 2, p. 1-11, 2011

HARLAN, J.R. Crops & man. American Society of Agronomy – ASA, **Crop Science Society of America CSSA**, Madison, 295p, 1975.

HARTLEY, H. O. The maximum F-ratio as a short-cut test for heterogeneity of variances. **Biometrika**, v. 37, n. 3/4, dec, 308-312, 1950.

HENDERSON, C. R. Best Linear Unbiased Estimation and Prediction Under a Selection Model. **Biometrics**, v. 1, n. 21, p. 423-447, jun. 1975.

HYMOWITZ, T. On the domestication of the soybean, **Economic Botany** 24:408-421, 1970.

HYMOWITZ, T. Speciation and cytogenetics. In: BOERMA, H. R.; SPECHT, J. E. (Ed.). **Soybeans: improvement, production and uses**. 3. ed. Madison: ASA, p. 97-136, 2004.

JIANG, Y.; WU, C.; ZHANG, L.; HU, P.; HOU, W.; ZU, W.; HAN, T. Long-day effects on the terminal inflorescence development of a photoperiod-sensitive soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] variety. **Plant Science**, v.180, p.504-510, 2011.

JIN, X.; LIU, S.; BARET, F.; HEMERLÉ, M.; COMAR, A. Estimates of plant density of wheat crops at emergence from very low altitude UAV imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 198, n. 7, p. 105-114, 2017.

KAVA, Lucas Terres. **Épocas de semeadura de cultivares de soja com diferentes ciclos de maturação**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

LEBOURGEOIS, V.; BÉGUE, A.; LABBÉ, S.; MALLAVAN, B.; PRÉVOT, L.; ROUX, B. Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? A crop monitoring test. **Sensors**, v. 8, n. 11, p. 7300-7322, 2008.

LOUHAICHI, M.; BORMAN, M. M.; JOHNSON, D. E. Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. **Geocarto International**, v. 16, n. 1, p. 65-70, mar. 2001.

LU, S.; XUAN, J.; ZHANG, T.; BAI, X.; TIAN, F.; ORTEGA-FARIAS, S. Effect of the Shadow Pixels on Evapotranspiration Inversion of Vineyard: a high-resolution uav-based and

ground-based remote sensing measurements. **Remote Sensing**, v. 14, n. 9, p. 2259, 7 maio 2022.

MARTINS, M. C.; CÂMARA, G. M. S.; PEIXOTO, C. P.; MARCHIORI, L. F. S.; LEONARDO, V.; MATTIAZZI, P. Épocas de semeadura, densidades de plantas e desempenho vegetativo de cultivares de soja. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 4, p. 851-858, 1999.

MASCARENHAS, H. A. A.; TANAKA, R. T.; WUTKE, E. B.; KIKUTI, H. Nitrogênio: a soja aduba a lavoura da cana. **O Agrônomo**. Campinas, v. 1, n. 57, 2005.

MASCARENHAS, H.A.A. e MIYASAKA, S. (1968). **Instruções para a cultura da soja**. Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo, CATI, Boletim Técnico 22, 48p.

MASUKA, B. *et al.* Gains in Maize Genetic Improvement in Eastern and Southern Africa: ii. cimmyt open pollinated variety breeding pipeline. **Crop Science**, v. 57, n. 1, p. 180-191, jan. 2017.

MATTOS, T. P.; HAMAWAKI, O. T.; NOGUEIRA, A. P. O.; LUIZ, M. C. P.; TEIXEIRA, F. G.; SHIGIHARA, D.; HAMAWAKI, R. L.; HAMAWAKI, C. D. L. Effect of sowing season on soybean performance. **Bioscience Journal**, v. 36, n. 5, p. 1607-1618, 9 jun. 2020.

MAUAD, M.; SILVA, T. L. B.; ALMEIDA NETO, A. I.; ABREU, V. G. Influência da densidade de semeadura sobre as características agronômicas na cultura da soja. **Agrarian**, v. 3, n. 9, p. 175-181, 2010.

MEOTTI, Giovane Vanin et al. Épocas de semeadura e desempenho agronômico de cultivares de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 14-21, 2012.

MOREIRA, F. F.; HEARST, A. A.; CHERKAUER, K. A.; RAINEY, K. M. Improving the efficiency of soybean breeding with high-throughput canopy phenotyping. **Plant Methods**, v. 15, n. 1, p. 1-9, 19 nov. 2019.

MÜLLER, L. Taxonomia e morfologia. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. A soja no Brasil. 1 ed. Campinas: **Instituto de Tecnologia de Alimentos**, p. 65-104, 1981.

MÜLLHER, Fernanda D. *et al.* Características morfológicas e físico-químicas de vagens de soja em diferentes estádios de maturação. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, n. 4, p. 687-695, 2011.

NAOE, A. M. L.; PELUZIO, J. M.; SOUSA, J. P. Estresse Ambiental na cultura da soja. **Revista de Integralização Universitária**, v. 12, n. 16, 2017.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L.; FARIAS, J.R.B.; OYA, T. **Estádios de desenvolvimento da cultura de soja**. In: Bonatto, E.R. Estresses em soja. Passo Fundo: Embrapa Trigo, cap.1, p.19-44, 2000.

NOGUEIRA, A. P. O.; SEDIYAMA, T.; BARROS, B. H.; TEIXEIRA, R. C. Morfologia, crescimento e desenvolvimento. In: SEDIYAMA, T. (Ed.). **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Mecnas, p. 7-16, 2009.

- NOGUEIRA, A.P.O.; SEDIYAMA, T. **Desenvolvimento, morfologia e germinação da semente**. In: SEDIYAMA, T. Tecnologias de produção de sementes de soja. 1. Ed. Londrina, PR: Editora Mecenas, 2013, p. 45-72.
- NOGUEIRA, A.P.O.; SEDIYAMA, T.; SOUSA, L. B.; HAMAWAKI, O. T.; CRUZ, C. D.; PERREIRA, D. G.; MATUSO, E. Análise de trilha e correlação entre caracteres em soja cultivada em duas épocas de semeadura. **Bioscience Journal**. Uberlândia, v. 28, n. 6, 2012.
- NUNES, H. V.; MIRANDA, G. V.; GALVÃO, J. C. C.; SOUZA, L. V.; GUIMARÃES, L. J. M. Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de milho-pipoca por meio de dois métodos de classificação. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Minas Gerais, v. 1, n. 3, p. 79, 2002.
- OLIVEIRA, A. B. **Fenologia, desenvolvimento e produtividade de cultivares de soja em função de épocas de semeadura e densidades de plantas**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.
- PENARIOL, A. Soja: **Cultivares no lugar certo**. Cultivar, Pelotas, v.16, p.31-32, 2000. Disponível em < <http://www.ipni.net/PUBLICATION/IA-BRASIL.NSF> >. Acesso em: 11, outubro, 2023.
- PENGELLY, B.C.; BLAMEY, F.P.C.; MUCHOW, R.C. Radiation interception and the accumulation of biomass and nitrogen by soybean and three tropical annual forage legumes. **Field Crops Research**, v.63, p.99- 112, 1999.
- PERISSATO, Samara Moreira. **Interação genótipo ambiente na produtividade, qualidade fisiológica e incidência de sementes verdes em soja (Glycine max L.)**. 2019.
- PETTER, Fabiano André et al. Elevada densidade de semeadura aumenta a produtividade da soja? Respostas da radiação fotossinteticamente ativa. **Bragantia**, v. 75, p. 173-183, 2016.
- PIMENTEL GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: Ed. ESALQ, 2009. 451 p.
- PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python Language Site: Documentation**, 2020. Página de documentação. Disponível em: <<https://www.python.org/doc/>>. Acesso em: 10 de jun. de 2022.
- R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2020. URL <https://www.R-project.org/>.
- RAFAIN, Eliakin Frederico et al. SISTEMAS DE SEMEADURA E ADUBAÇÃO EM SOJA E SUA RELAÇÃO COM AS PLANTAS DANINHAS. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 2, p. 281-286, 2020.
- REGISTRO NACIONAL DE CULTIVARES. **MAPA - MINISTERIO DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO**, 2007.
- RESENDE, M. D. V. de; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 3, p. 182-194, jul. 2007.

REYNALDO, Étore Francisco et al. NOTA TÉCNICA: Influência da velocidade de deslocamento na distribuição de sementes e produtividade de soja. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, v. 24, n. 1, p. 63-67, 2016.

ROCHA, Maurisrael de Moura. **Seleção de linhagens experimentais de soja para adaptabilidade e estabilidade fenotípica**. 2002. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

RODRIGUES, O.; DIDONET, A. D.; LHAMBY, J. C. B.; TEIXEIRA, M. C.; GUARESCHI, R. **Efeito da temperatura e do fotoperíodo na duração e na taxa de crescimento de grãos de soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 28p (Embrapa Trigo. Boletim de pesquisa e desenvolvimento online, 35), 2006.

ROTH, L.; AASEN, H.; WALTER, A.; LIEBISCH, F. Extracting leaf area index using viewing geometry effects—A new perspective on high-resolution unmanned aerial system photography. **Journal of Photogrammetry And Remote Sensing**, v. 141, p. 161-175, jul. 2018. 10.1016/j.isprsjprs.2018.04.012.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System**. Open-Source Geospatial Foundation Project, 2023. <http://qgis.osgeo.org>.

SCHIRRMANN, M.; HAMDORF, A.; GARZ, A.; USTYUZHANIN, A.; DAMMER, K. Estimating wheat biomass by combining image clustering with crop height. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 121, p. 374-384, 2016.

SEDIYAMA, T.; PEREIRA, M. G.; SEDIYAMA, C. S.; GOMES, J. L. L. **Botânica, descrição da planta e cruzamentos artificial**. In: Cultura da Soja – I parte. Viçosa: UFV, p. 5-6, 1985.

SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. **Soja: do Plantio à Colheita**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 333 p., 2015.

SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R. C.; REIS, M. S. **Melhoramento da Soja**. In: BORÉM, A. (Ed.). Melhoramento de espécies cultivadas. Viçosa: UFV, p. 553-604, 2005.

SOARES, I. O. *et al.* Interaction between soybean cultivars and seed density. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, n. 09, p. 1425, 2015.

SOUZA, R. T. G. *et al.* Spray droplet spectrum and spray deposition in different soybean sowing systems. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 9, p. 1195-1202, 2017.

SUGIURA, R. *et al.* Field phenotyping system for the assessment of potato late blight resistance using RGB imagery from an unmanned aerial vehicle. **Biosystems Engineering**, v. 148, n. 6, p. 1-10, 2016.

TATTARIS, M.; REYNOLDS, M. P.; CHAPMAN, S. C. A direct comparison of remote sensing approaches for high-throughput phenotyping in plant breeding. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 1131, 2016.

THOMAS, A. L. **Soja - Tipos de crescimento da planta**. Porto Alegre: UFRGS, 2018.

VERNETTI, F. J.; JUNIOR, F. J. V. **Genética da soja: caracteres quantitativos e diversidade genética**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 221, 2009.

VITORINO, H. D. S., SILVA JUNIOR, A. C. D., GONÇALVES, C. G.; MARTINS, D. Interference of a weed community in the soybean crop in functions of sowing spacing. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 4, p. 605-613, 2017.

WEISS, M.; JACOB, F.; DUVEILLER, G. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. **Remote Sensing of Environment**, v. 236, p. 111402, 2020.

XAVIER, A.; HALL, B.; A HEARST, A.; A CHERKAUER, K.; RAINEY, K. M. Genetic Architecture of Phenomic-Enabled Canopy Coverage in Glycine max. **Genetics**, v. 206, n. 2, p. 1081-1089, 1 jun. 2017.

YANG, W. *et al.* Crop phenomics and high-throughput phenotyping: Past decades, current challenges, and future perspectives. **Molecular Plant**, Shanghai, v. 13, p. 187-214, Feb. 2020.

YANG, Z.; WILLIS, P.; MUELLER, R. Impact of Band-Ratio Enhanced AWIFS Image to Crop Classification Accuracy. In: Pecora – The Future of Land Imaging... Going Operational, 17. 2008, Denver, Colorado, USA. **Proceedings**. Maryland: (ASPRS), 2008.

ZHANG, T.; LIU, Y.; LI, J. Wheat Canopy Cover Estimation by Optimized Random Forest and UAV Multispectral imagery. **Journal Of Physics: Conference Series**, v. 2203, n. 1, p. 012013, 1 fev. 2022.

ZIMMERMANN, Pedro et al. **Propriedades físicas do solo e níveis de palha de azevém na produtividade da soja em plantio direto com integração lavoura pecuária**. 2023.