



PABLO DE SOUSA ARANTES

**DETERMINAÇÃO DE MATURAÇÃO EM SOJA
UTILIZANDO MODELOS MULTIPLICATIVOS E
ANÁLISE DE IMAGEM**

LAVRAS - MG

2023

PABLO DE SOUSA ARANTES

**DETERMINAÇÃO DE MATURAÇÃO EM SOJA UTILIZANDO MODELOS
MULTIPLICATIVOS E ANÁLISE DE IMAGENS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi
Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

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

Arantes, Pablo Sousa.

Determinação de maturação em soja utilizando modelos
multiplicativos e análise de imagens / Pablo de Sousa Arantes. -
2023.

57 p.

Orientador(a): Adriano Teodoro Bruzi.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Glycine max (L) Merrill. 2. Maturação absoluta. 3.
Fenotipagem de alto rendimento. I. Bruzi, Adriano Teodoro. II.
Título.

PABLO DE SOUSA ARANTES

**DETERMINAÇÃO DE MATURAÇÃO EM SOJA UTILIZANDO MODELOS
MULTIPLICATIVOS E ANÁLISE DE IMAGENS**

**DETERMINATION OF SOYBEAN MATURATION USING
MULTIPLICATION MODELS AND IMAGE ANALYSIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 17 de janeiro de 2023.

Dr. Adriano Teodoro Bruzi, UFLA

Dr (^a). Ligia de Oliveira Amaral, BASF S.A.

Dr. Carlos Eduardo Pulcinelli, Alliance One International

Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi
Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

*A DEUS, aos meus pais pelo apoio incondicional em todas as etapas da minha vida.
Aos meus amigos e a todos que incentivaram para que eu conseguisse chegar até aqui.*

Com todo amor, admiração, respeito e gratidão.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre guiar meus passos, pela proteção, discernimento e perseverança para continuar sempre na busca dos meus objetivos.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), especialmente ao Departamento de Biologia (DBI), e ao Programa de Pós- graduação em Genética e Melhoramento de Plantas pela oportunidade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da bolsa de mestrado. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Aos meus pais, minha mãe Adriana, ao meu pai Evaldo, pelos conselhos e motivação, e a quem devo toda minha educação como pessoa, meu amor e respeito, pois são meus exemplos a serem seguidos. Serei eternamente grato pelo enorme esforço que sempre fizeram para que eu pudesse ter as melhores condições de estudo.

Ao meu irmão Lorrان, por toda amizade, companheirismo e conselhos.

Ao professor Dr. Adriano Teodoro Bruzi, pela orientação, amizade, dedicação confiança, paciência, disponibilidade, acompanhamento e por todos os ensinamentos passados, grande exemplo de profissional e de pessoa que me acompanhará por toda a vida.

Ao Grupo Pesquisa Soja pelo companheirismo, convivência, amizade, ensinamento e auxílio durante toda a condução dos experimentos.

A todos que, de alguma forma, contribuíram gentilmente para à realização deste trabalho.

RESUMO

A adaptabilidade de cultivares de soja altera-se conforme a variação da latitude, sobretudo devido à sensibilidade da cultura ao fotoperíodo. As condições climáticas influenciam diretamente no crescimento e desenvolvimento da planta de soja. Assim as cultivares de soja apresentam variações quanto a maturação absoluta em diferentes locais de cultivo, anos e épocas de semeadura. Dessa forma, objetivou-se estimar a maturidade relativa de cultivares de soja utilizando diferentes estratégias, assim como mensurar a acurácia de predição da maturidade relativa dos diferentes métodos. Os experimentos foram conduzidos no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária da Universidade Federal de Lavras - Fazenda Muquém, no município de Lavras – MG, situado à latitude de 21°12 S, longitude 44°58' W e altitude de 954 m, nos anos agrícolas, 2016/2017, 2017/18, 2018/19, 2019/20 e 2021/22 e no Centro de Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia da Universidade Federal de Lavras – Fazenda Palmital, no município de Ijaci-MG, situada à latitude de 21°09' S, longitude 44°54' W e altitude de 920 m, nas safras 2019/20 e 2021/22 . Os tratamentos foram compostos de 54 cultivares comerciais de soja, em seis ambientes, no delineamento de blocos completos casualizados, com diferentes números de repetições, sendo as parcelas compostas por quatro linhas de cinco metros, perfazendo assim um conjunto de dados desbalanceados. O caráter avaliado foi a maturação absoluta (dias). Utilizou-se a análise conjunta (multiambiente), modelo de fator analítico multiplicativo misto (FAMM) e fenotipagem de alto rendimento por meio de veículos aéreos não tripulado (VANTs). As análises estatísticas dos dados foram realizadas utilizando o software R. Uma regressão das médias para o caráter maturação absoluta para a classificação das cultivares nos grupos de maturidade relativa foi obtida, utilizando-se cultivares com grupo de maturação mais estável. O método FAMM figura-se como uma estratégia eficiente na predição da maturação absoluta e relativa em soja, em condições tropicais. O emprego da análise de imagem por coletadas por meio de VANTs apresenta menor correlação entre o grupo de maturidade (G.M) predito e o G.M informado no registro nacional de cultivares (RNC), contudo, é uma estratégia promissora, sendo o principal desafio a melhoria na precisão na obtenção das imagens.

Palavras - chave: *Glycine max* (L) Merrill. Maturação absoluta. Fenotipagem de alto rendimento.

ABSTRACT

The adaptability of soybean cultivars could change as the latitude, mainly due to the sensitivity of the crop to the photoperiod. Climate conditions can directly influence the growth and development of the soybean crop. Thus, soybean cultivars show variations in terms of full maturity in different sites, crop season, and sowing times. Thus, the purpose was to estimate the relative maturity of soybean cultivars using different strategies, as well as to measure the relative maturity prediction accuracy of the different methods. The experiments were carried out at the Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico of the Federal University of Lavras - Fazenda Muquém, in Lavras - MG, located at latitude 21°12' S, longitude 44°58' W and altitude of 954 m, in the crop season, 2016/2017, 2017/18, 2018/19, 2019/20 and 2021/22. At Centro de Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia – Fazenda Palmital, in Ijaci, located at latitude 21°09' S, longitude 44°54' W and altitude of 920 m, in the 2019/20 and 2021/22 crop season. The treatments were 54 commercial soybean cultivars in six environments, in a randomized complete block design, with different numbers of repetitions, with the plots consisting of four rows of five meters, thus making up an unbalanced data set. The evaluated trait was full maturity (days). Joint analysis (multi-environment), factor analysis, multiplicative mixed models (FAMM) and high-throughput phenotyping using UAVs were adopted. Statistical analysis of the data were done using the R software. A regression model of the means for full maturity to estimate the relative maturity was obtained, adopting the stable cultivars. The FAMM method appears to be an efficient strategy for predicting full and relative maturity in soybean under tropical conditions. The use of image analysis by means of UAVs presents a lower correlation between the predicted RM and the original reported in the (National Cultivar Register), however, it is a promising strategy. The main challenge is the accuracy associated to the image uptake.

Keywords: Glycine max (L) Merrill. Full Maturity. High-throughput phenotyping.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Fenologia da cultura da soja.....	12
2.2	Fatores ambientais relacionados à cultura da soja em condições tropicais	14
2.3	Maturação absoluta e relativa na cultura da soja	17
2.4	Emprego da análise de imagem no melhoramento	19
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1	Local.....	23
3.2	Tratamentos genéticos	23
3.3	Condução dos experimentos	25
3.4	Análise estatística dos dados fenotípicos.....	25
3.4.1	Análise estatística – Método multiambiente (MET).....	25
3.4.2	Análise estatística – Método fenotipagem de alto rendimento.....	27
3.4.3	Análise estatística – Método de fator analítico multiplicativo misto (FAMM)...	31
3.5	Análise de regressão	34
3.6	Eficiência das estratégias de classificação de estimação dos grupos de maturidade relativa.....	35
4	RESULTADOS	36
5	DISCUSSÃO	45
6	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	50
	ANEXO.....	56

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, até a década 70, o cultivo da soja era restrito a região sul. Por ser uma planta com origem e domesticação chinesa, a sensibilidade das cultivares ao fotoperíodo foi o principal entrave para a expansão da cultura para as regiões mais ao norte brasileiro. Contudo, por meio dos programas de melhoramento genético, a introdução de genes que condicionaram plantas com período juvenil longo (P JL), possibilitou o cultivo em baixas latitudes. A sensibilidade ao fotoperíodo é uma característica variável entre as cultivares de soja, ou seja, cada genótipo possui seu fotoperíodo crítico. Por essa razão, a faixa de adaptação é variável à medida que há o deslocamento geográfico (semeadura mais ao norte ou mais ao sul) e, ou temporal (semeadura mais antecipada ou mais tardia) (ALLIPRANDINI *et al.*, 2009; CAVASSIM *et al.*, 2014; CARVALHO *et al.*, 2020).

As cultivares brasileiras estão classificadas entre os grupos de maturação 5.0 a 10.0. Esta classificação é validada dentro da faixa de adaptação da cultivar, variando de acordo com a latitude (ALLIPRANDINI *et al.*, 2009). A maturação é um caráter fortemente influenciado pelos fatores ambientais, sendo, fotoperíodo e temperatura (OHIGASHI *et al.*, 2019), época de semeadura (BEIXEIRA *et al.*, 2018), déficit hídrico (ZANNON *et al.*, 2015) e altitude (BARBOSA *et al.*, 2017) os fatores ambientais mais relevantes para este caráter.

Em regiões tropicais e subtropicais, uma alternativa para atenuar-se os fatores ambientais na cultura da soja se perfaz com o emprego de macroregiões sojícolas (MRS) bem como das regiões edafoclimáticas (REC) (KASTER; FARIAS, 2012). Muito embora, esta alternativa tem sido apregoada para o cultivo de soja no Brasil, não é possível de mitigar todos os efeitos previsíveis e imprevisíveis na maturação, fato este, que estimula os melhoristas de soja a buscar alternativas mais eficientes na estimativa da maturação relativa na cultura (CAVASSIM *et al.*, 2014; CARVALHO *et al.*, 2020).

Nos últimos anos, o desenvolvimento e o uso acentuado de veículos aéreos não tripulados (VANTs) ou drones, destacaram-se como uma nova era para fenotipagem de plantas. Tradicionalmente, a fenotipagem era realizada de forma manual, sendo as medições dos caracteres mais trabalhosas, em que dependendo do caráter a ser avaliado demanda muito tempo e dispêndio para a obtenção dos dados. Logo, o emprego de VANTs figura-se como uma tecnologia promissora para a fenotipagem de plantas, pois têm a capacidade de fornecer imagens de alta resolução espacial em um curto espaço de tempo, além de maior precisão (NARAYANAN *et al.*, 2019).

No desenvolvimento de novas cultivares de soja, múltiplas características são avaliadas, dentre elas a maturidade relativa. Uma alternativa para se mensurar este caráter é a avaliação

visual, na qual observações são feitas em cada parcela para se determinar a data em que 95% das vagens da planta atingiram a maturação. Para melhor ajuste, cultivares de maturidade relativa com maior estabilidade são empregadas para atribuir G.M, e posteriormente atribuir às novas cultivares e/ou progênies a maturidade relativa, através de modelos de regressão linear (LINDSAY *et al.*, 2020).

Na cultura da soja, a interação genótipos por ambientes (GxA) assume papel importante na manifestação fenotípica dos principais caracteres de importância econômica (SOARES *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2015; ZAMBIAZZI *et al.*, 2017; AMARAL *et al.*, 2019). Assim, o emprego de modelos estatísticos mais robustos tais como o modelo de fator analítico multiplicativo misto (FAMM) pode auxiliar a identificação de cultivares estáveis (CULLIS *et al.*, 2018), aprimorando assim a estimação de caracteres de interesse como a maturação.

Além da utilização de modelos estatísticos robustos, os avanços na tecnologia de sensores e imagens que estão sendo implementados em programas de melhoramento e pesquisa, podem permitir, o desenvolvimento de uma plataforma de fenotipagem de alto rendimento por meio VANT. As imagens oriundas de câmeras digitais fornecem diferentes informações relacionadas a cultura, tornando-se mais uma alternativa para se prever a maturação absoluta (YU *et al.*, 2016).

Ante ao exposto, objetivou-se estimar a maturidade relativa de cultivares de soja utilizando diferentes estratégias, assim como estimar a acurácia de predição da maturidade relativa dos diferentes métodos empregados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fenologia da cultura da soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merr.) caracteriza-se como uma das culturas mais estudadas e importantes da economia mundial, sendo considerada o principal produto do agronegócio brasileiro, ocupando uma área de aproximadamente 40 milhões de hectares e uma produção de 124 milhões de toneladas (CONAB, 2021). A soja cultivada foi domesticada de seu ancestral selvagem *Glycine soja* Sieb. & Zucc. há mais de 5 mil anos nas regiões temperadas da China. No Brasil os primeiros cultivos comerciais ocorreram na região sul, e a partir da década de 1970 a cultura expandiu para a região Centro-Oeste do país, principalmente sobre o bioma do cerrado. O sucesso desse avanço se deu principalmente por meio de pesquisas fitotécnicas e do melhoramento genético.

Buscando uma comunicação mais inerente, o uso de uma linguagem unificada na descrição dos estádios de desenvolvimento agiliza e facilita a compreensão entre os diversos públicos envolvidos com a cultura da soja (EMBRAPA, 2014). Além de possibilitar comparações de pesquisas realizados em locais distintos, auxílio na tomada de decisões de práticas de manejo, assim como o melhor entendimento do crescimento e desenvolvimento da cultura, são alguns pontos que justificam o uso das escalas fenológicas de plantas (NOGUEIRA *et al.*, 2013).

A metodologia de descrição dos estádios de desenvolvimento mais adotada, foi a elaborada por Fehr e Caviness em 1997. O sistema proposto por Fehr e Caviness divide os estádios de desenvolvimento em vegetativo e reprodutivo. Os estádios vegetativos são designados pela letra V e os reprodutivos pela letra R. Com exceção dos estádios VE (emergência) e VC (cotiledonar) as letras V e R, são seguidas de índices numéricos que identificam os estádios específicos, nessas duas fases de desenvolvimento (FARIAS *et al.*, 2007).

O estágio vegetativo denominado VE representa a emergência dos cotilédones, isto é plântula recém-emergida. Uma planta pode ser considerada emergida quando seus cotilédones se encontram acima da superfície do solo. O estágio vegetativo VC representa o estágio em que os cotilédones se encontram completamente abertos, onde os bordos das folhas unifoliadas não se tocam (Embrapa, 2020). A partir de VC os estádios vegetativos são numerados sequencialmente V1, V2, V3, V4, V5...Vn em que *n* é número de nós sobre a haste principal com folha completamente desenvolvidas, iniciando-se a contagem dos nós, a partir das folhas unifoliadas, visto que nó é a parte do caule onde as folhas se desenvolvem, ao qual é usado para determinação dos estádios vegetativos.

Assim no estágio V1, com folhas unifoliadas completamente desenvolvidas, e a primeira folha trifoliada com os bordos não mais se tocando, tem-se o primeiro nó. Uma planta atinge o estágio V2, ou segundo nó, quando a primeira folha trifoliada está completamente desenvolvida, e os bordos da folha trifoliada subsequente não mais se tocam. Assim sucessivamente a contagem segue para os demais estádios vegetativos V3, V4, V5...Vn (EMBRAPA, 2007).

O estágio reprodutivo é designado pela letra R prosseguida de um índice numérico, basicamente dividido em quatro partes: R1 e R2 descreve o florescimento, R3 e R4 desenvolvimento de vagens, R5 e R6 desenvolvimento de sementes e R7 e R8 maturação da planta (FEHR; CAVINESS, 1997).

O estágio R1 é caracterizado quando a planta apresenta uma flor aberta em qualquer nó da haste principal, a partir de R1 ocorre também um intenso crescimento em profundidade e volume das raízes, estendendo-se até R4 (NOGUEIRA *et al.*, 2009). O estágio R2 também denominado de florescimento pleno, caracteriza-se quando ocorre a abertura de uma flor nos dois últimos nós da haste principal, estágio também caracterizado pelo rápido acúmulo de matéria seca (NEUMAIER *et al.*, 2000).

Em R3 inicia-se o desenvolvimento das vagens, essas com até 5mm de comprimento em um dos quatro nós superiores, já o estágio R4 é caracterizado por apresentar vagens com 2 cm de comprimento nos últimos quatro nós com folha completamente desenvolvida (FEHR; CAVINESS, 1997). O número de vagens por planta constitui um dos componentes de rendimento de produtividade da cultura. Estresses abióticos e bióticos podem afetar o rendimento de grãos de forma irreversível (NOGUEIRA *et al.*, 2012).

A formação e desenvolvimento das sementes são atribuídos aos estádios R5 e R6. Em R5, as sementes apresentam-se com aproximadamente 3 mm de comprimento, em um dos quatro nós superiores com folha completamente desenvolvida, já no estágio R6, também denominado de grão verde ou vagem cheia, em um dos últimos quatro nós, as sementes preenchem toda a cavidade da vagem. Durante este período ocorre intensa demanda por água, e elevado acúmulo de matéria seca (NOGUEIRA *et al.*, 2012).

Os estádios R7 e R8 correspondem a maturação. Em R7 é atingida a maturação fisiológica da planta, sendo caracterizado pela presença de pelo menos uma vagem de cor madura na haste principal, neste estágio a planta atinge o máximo acúmulo de matéria seca, a partir do qual inicia-se a perda de água pela planta (NOGUEIRA *et al.*, 2013). Já em R8, o último estágio de desenvolvimento, é representado quando 95% das vagens apresentam coloração de vagem madura. Neste momento ocorre a perda acentuada de água, sendo

necessário de 5 a 10 dias de tempo seco para a colheita, onde as sementes devem apresentar menos de 15% de umidade (NOGUEIRA *et al.*, 2013).

2.2 Fatores ambientais relacionados à cultura da soja em condições tropicais

Os fatores ambientais são de grande influência na produção agrícola. Dentre esses fatores os climáticos são tidos como os principais responsáveis pela variabilidade tanto espacial como anual no desenvolvimento e produção das culturas (SENTELHAS *et al.*, 2021). O crescimento e desenvolvimento de uma espécie vegetal são mediados pelo acúmulo de matéria seca durante seu ciclo, esta por sua vez, se dá por um processo exclusivo das plantas, a fotossíntese, pela qual através da energia luminosa do sol, o dióxido de carbono (CO₂) presente na atmosfera e a água absorvida do solo, participam de reações químicas para produzir açúcares. Estes juntamente com os nutrientes minerais absorvidos pela planta, são os responsáveis pelos carboidratos, proteínas e lipídeos constituintes da matéria seca. (TAIZ; ZEIGER, 2013).

O desenvolvimento de uma planta, o fenótipo, é a ação do genótipo, ou seja, da sua constituição genética, mais a ação do ambiente, e da ação da interação entre eles. Dessa forma o fenótipo de qualquer indivíduo é resultado expressão: $F = G + A + GA$ (RAMALHO *et al.*, 2012) em que, a interação genótipos x ambientes é o desempenho dos genótipos, em relação ao seu comportamento, quando testado em diferentes (BORÉM; MIRANDA; FRITSCHÉ-NETO, 2017).

Inicialmente no Brasil o cultivo da soja era restrito a região sul do país, devido sua origem e domesticação, encontrando nessa região condições semelhantes ao de sua ascendência. Atualmente a soja é cultivada praticamente em todo território brasileiro, desde as baixas latitudes até as mais altas, estando assim exposta à diferentes ambientes, e condições climáticas (EMBRAPA, 2020).

Até os anos 1970, o fotoperíodo era o maior obstáculo para o seu cultivo em outras regiões do país para além do sul. A sensibilidade ao fotoperíodo é variável dentre as cultivares (EMBRAPA, 2014). Muitas espécies de plantas florescem em resposta ao comprimento do dia, na ausência de horas luz favorável, ocorre o prolongamento da fase vegetativa ciclo, assim como sob influência de um fotoperíodo adequado o florescimento é induzido (SEDIYAMA, 2015).

A soja é uma planta de dias curtos, assim ela floresce em fotoperíodos menores que um máximo crítico. A resposta ao comprimento do dia está ligada ao fotoperíodo crítico, ou seja, o número de horas luz capaz de induzir a floração. Atualmente existe uma grande diversidade de cultivares de soja disponíveis no mercado, e estas com um grau de resposta diferente ao

estímulo da duração do dia, em função disso a adaptação de cada cultivar varia à medida que se desloca em direção ao norte ou ao sul, ou seja em função da latitude (EMBRAPA, 2007).

A percepção do fotoperíodo crítico depende do período juvenil, que pode ser longo ou curto. Em cultivares com período juvenil curto, a percepção fotoperiódica ocorre mais cedo, quando surgem as folhas unifoliadas, a partir desse momento quando o fotoperíodo for menor ou igual ao fotoperíodo crítico a cultivar será induzida a florescer (BARROS; SEDIYMA 2009). Já o período juvenil longo, a indução ao florescimento ocorre mais tarde, a partir do quinto a sétimo trifólio completamente formado, mesmo na condição de fotoperíodo crítico, as plantas não florescem, possibilitando assim maior crescimento vegetativo. Sendo assim as cultivares que apresentam período juvenil longo, apresentam maior faixa de adaptabilidade (EMBRAPA, 2007).

Cruz *et al.* (2010), Shigihara e Hamawaki (2005) em experimentos com genótipos de diferentes ciclos, em baixas latitudes demonstraram a resposta fotoperiódica da cultura, em que os genótipos levaram poucos dias para florescerem na condição de baixa latitude, pois quanto mais se diminui a latitude, mais rápido os genótipos de soja florescem, por atingirem o fotoperíodo crítico em menor tempo. Uma estratégia utilizada pelos melhoristas de soja foi a utilização do período juvenil longo, uma vez que em condições de dias curtos, o florescimento é retardado, possibilitando maior crescimento vegetativo.

A radiação solar também é um fator a se ponderar no desenvolvimento e crescimento da soja, pois é a partir de tal que provém à energia necessária para a realização da fotossíntese (TAIZ; ZIEGER, 2004). Além de que, a radiação solar está relacionada com a alongação da haste principal, ramificações da haste, expansão foliar, pegamento de vagens e grãos (CÂMARA, 2000). A soja por ser uma planta de metabolismo C3 é menos eficiente na utilização da radiação solar, assim o sombreamento diminui a concentração de açúcares nas folhas, causando redução no número de vagens, redução no peso de grãos, comprometendo a produtividade da cultura (LIU, *et al.*, 2011).

Devido as características morfológicas da soja, a radiação solar não se distribuí uniformemente ao longo do dossel da planta, podendo ser de 8 a 12 vezes maior na parte superior, em comparação a parte inferior do dossel. Portanto, em longos períodos de dias nublados e chuvosos, nos quais a radiação incidente é menor, a parte inferior da planta pode ser mais comprometida quanto a produção de energia e, conseqüentemente, pode limitar a produtividade da cultura. Este dano torna-se mais pronunciado uma vez que o estrato inferior contribui com cerca de 35 e 45% da produção total de uma planta de soja. Assim um sistema

produtivo onde outras variáveis, como pragas, doenças e plantas daninhas, a radiação pode se tornar um fator limitante da produtividade (MULLIER *et al.*, 2017).

Em ambientes com o fotoperíodo constante, a temperatura é que irá influenciar o florescimento, sendo também uma moduladora da duração do ciclo da cultura (SENTELHAS, 2021). Fotoperíodo e temperatura são importantes para o desenvolvimento da cultura da soja, por promoverem mudanças qualitativas ao longo do seu ciclo. Assim as respostas a esses dois fatores são diferentes em cada estágio da planta, principalmente entre a emergência e a floração. (RODRIGUES *et al.*, 2001).

A faixa para uma melhor adaptação da cultura da soja, encontra-se entre 20°C e 30°C, sendo a temperatura ideal para seu crescimento e desenvolvimento em torno de 30°C (EMBRAPA, 2020). Para uma boa emergência, a temperatura ideal está em torno 25°C, sendo que temperaturas abaixo de 20°C comprometem a germinação e emergência. A temperatura também é essencial para a floração, pois esta é induzida, por temperaturas acima de 13°C. Bem como a maturação pode ser acelerada em decorrência de altas temperaturas (EMBRAPA, 2014).

O crescimento vegetativo é pequeno ou nulo em temperaturas menores ou iguais a 10°C, e em temperaturas acima de 40°C ocorrem efeitos adversos na taxa de crescimento, provocando distúrbios na floração e diminuem a retenção de vagens. Jumrani e, Bhatia (2018) demonstram que o aumento da temperatura diurna e noturna de 30° C e 22° C, para temperaturas superiores a 34° C e 24° C, causaram a redução da área foliar, peso de sementes, redução da biomassa vegetal, número de vagens e número de sementes por planta, em que esses fatores se agravam de forma mais acentuada com o aumento da temperatura.

A disponibilidade hídrica é fundamental para o bom desenvolvimento da cultura, em que a ocorrência de déficit hídrico em qualquer fase do ciclo resulta em perda de produtividade, porém nos períodos de germinação-emergência e de floração e enchimento de grão são os mais críticos. Para que ocorra uma boa germinação, a semente precisa absorver pelo menos 50% do seu peso em água, sendo que nesse período a umidade do solo deve estar entre 50% e 85% da capacidade de campo. À medida que a cultura vai se desenvolvendo a necessidade de água vai aumentando, tendo a máxima absorção de água 7-8 mm.dia⁻¹ durante a floração-enchimento de grãos, decrescendo após essa época (EMBRAPA, 2020).

Déficits hídricos, durante a floração e enchimento de grãos, causam queda prematura de folhas e de flores e abortamento de vagens, resultando na redução do rendimento de grãos. A necessidade total de água na cultura da soja, para obtenção do máximo rendimento, varia entre

450 a 800 mm/ciclo, dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo (EMBRAPA, 2014).

O estresse hídrico inibe a altura e área foliar, tornando-se mais severo a medida que a frequência e a duração do estresse aumentam, com uma intensidade menos frequente de estresse hídrico, existe uma melhor resposta a reidratação, tendo uma maior compensação de recuperação aos danos causados. Sendo que a resposta de recuperação e compensação ao estresse hídrico é maior no estágio vegetativo, em comparação ao estágio reprodutivo (Dong, 2019).

2.3 Maturação absoluta e relativa na cultura da soja

Em razão da sensibilidade ao fotoperíodo, a adaptabilidade de cada cultivar de soja varia com a latitude, ou seja, à medida que o seu cultivo se desloca em direção ao sul ou ao norte. Sendo assim, cada cultivar tem uma faixa limitada de adaptação (EMBRAPA, 2018). Para medir a sensibilidade ao fotoperíodo, grupos de maturidade foram sugeridos, sendo a maturação absoluta da cultivar o número de dias da emergência até a maturação das vagens, que podem variar, dependendo do local e da época de semeadura (ANDREI *et al.*, 2018).

Alliprandini *et al.* (2009) salientam que, a grande maioria das cultivares adaptadas as condições brasileiras apresentam um ciclo em torno de 90 a 150 dias, sendo classificadas entre os grupos de maturação 5 a 9. Esta classificação é validada dentro da faixa de adaptação da cultivar, variando de acordo com a latitude. Entre os estados produtores de soja no país há uma ampla variação de latitude, cada faixa de latitude possui um intervalo de grupos de maturação associado para a recomendação de cultivares.

Em virtude da grande diversidade de ecossistemas, tipos de solo e clima (latitude, longitude e altitude) encontrados no Brasil, foram estabelecidas 5 macrorregiões sojícolas (MRS) e 20 regiões edafoclimáticas (REC), assim dividindo o extenso território brasileiro, em pequenas regiões com condições mais homogêneas, favorecendo a realização de pesquisas e indicação de cultivares e respectivas épocas de semeadura. Os fatores considerados para as divisões MRS foram latitude (fotoperíodo e temperatura) e precipitação. As RECs foram definidas em função da altitude (temperatura) e do tipo de solo (KASTER; FARIAS, 2012).

Nos estados produtores da região sul (MRS 1) recomenda-se o emprego de cultivares dos grupos 5.0 a 6.0. Essa região abrange os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Para as regiões de São Paulo, sul de Minas Gerais e Mato Grosso do Sul (MRS 2) recomenda-se as cultivares dos grupos 6 a 7. No centro-oeste norte do Mato Grosso do Sul, Goiás e Mato Grosso, sul de Tocantins, Bahia (MRS 3 e MRS 4) são cultivares dos grupos 7 a 8. Já para o norte (MRS 5) de Tocantins, Piauí, e Maranhão, recomenda-se cultivares dos grupos

8 e 9 (EMBRAPA, 2013). Ademais, os grupos de maturação abrangem variações numéricas decimais, sendo cada decimal correspondente a uma variação entre 2 a 3 dias no ciclo total das cultivares (ALLIPRANDINI *et al.*, 2009).

Andrei *et al.*, 2018 em estudo mais detalhado, demonstraram G.Ms 5.3 a 5.9 tiveram o melhor desempenho na MRS 1 que contempla a região sul do país. Nessas latitudes (24 e 30°S), o comprimento do dia é maior do que no equador (latitude 0°), tornando as cultivares com os GMs anteriores mais bem adaptadas a esses fotoperíodos. Em relação ao MRS 2, as cultivares com GM 6.0 a 6.3 apresentaram melhor desempenho nas regiões edafoclimáticas 201 e 202, e as cultivares com GM 6.4 a 7.0 tiveram melhor desempenho na região 204, isto demonstra que apesar de estarem em regiões com latitudes semelhantes, a diferença entre temperaturas encontradas nessas regiões edafoclimáticas influenciaram o desempenho das cultivares. As regiões do Centro-Oeste brasileiro, que compreendem as macrorregiões MRS3 e MRS4, estão em baixas latitudes, sendo as cultivares para com melhor desempenho em MRS3, apresentam GMs 7.1 a 7.9; e para MRS4, cultivares com GMs 7.7 a 8.4.

Em recente trabalho realizado por Carvalho (2017) em que avaliou-se a adaptabilidade e estabilidade de acordo com a classificação em grupos de maturidade, constatou-se que foi evidente a alteração na estimativa dos componentes de estabilidade. O autor ainda ressalta que este fato ocorre, por haver muita influência dos fatores ambientais nesse caráter, ou seja, a maturação das cultivares ocorre em épocas distintas o que permite com que os fatores ambientais não ocorram de forma homogênea para todas as cultivares.

Em outro estudo realizado por Cavassim (2014) observou-se o efeito dos ambientes juntamente com os métodos de análises de estabilidade para estimar a maturidade relativa de cultivares de soja, o autor elucidou que o caráter maturidade relativa é muito influenciado pelos fatores ambientais e que esta é influenciável pela metodologia a qual se utiliza para se estimar o índice.

Moenizade (2021) desenvolveu uma abordagem robusta e automática para estimar a maturidade relativa da soja usando sistemas de fenotipagem baseados em veículos aéreos não tripulados (VANTs). Um modelo híbrido combinando redes neurais convolucionais (CNN) e memória de longo prazo (LSTM) foi utilizado para extrair características e capturar o comportamento sequencial de dados de séries temporais. O modelo proposto foi testado em seis ambientes diferentes nos Estados Unidos. Os resultados sugerem a eficácia do modelo CNN-LSTM proposto em comparação com o método de regressão local (LOESS).

Ainda utilizando-se do potencial de determinar datas de maturidade de linhagens usando imagens multiespectrais baseadas em UAV, Jing Zhou (2019), avaliou as datas de maturidade

de diferentes linhagens de soja, utilizando-se o modelo de regressão de mínimos quadrados parciais (PLSR) e dados de imagens, os resultados mostram que o uso de imagens multiespectrais baseadas em UAV são promissoras e práticas na estimativa de datas de maturidade de linhagens de soja.

2.4 Emprego da análise de imagem no melhoramento

A interação entre os genes com os distintos ambientes (GxE) ao longo do ciclo de vida de uma planta podem afetar o seu desempenho (ORGOGOZO *et al.*, 2015). O efeito do ambiente sobre as plantas pode ser claro, pois seu estilo de vida estático impede o uso de estratégias para evadir-se de certas situações. Assim novas tecnologias, como o sensoriamento remoto, permitem o registro detalhado da história ambiental das plantas, bem como a resposta destas (YANG, 2020).

Nas ciências aplicadas, o termo sensoriamento remoto se refere à obtenção de imagens à distância sobre a superfície terrestre, utilizando sensores embarcados (aeronaves ou satélites). O sensoriamento remoto oferece solução sinótica para o monitoramento de plantas, tendo potencial de uso na agropecuária (DÖRNHÖFER; OPPELT, 2016; YU *et al.*, 2016). O sensoriamento remoto aplicado à agricultura é baseado na espectroscopia da radiação refletida após interação da radiação eletromagnética incidente proveniente do sol com diferentes alvos na superfície da terra. Essas medidas são oriundas do espectro refletido, mas especificadamente abrangendo a região do visível (0.4 – 0.7 μm), infravermelho próximo (0.7 – 1.3 μm) e infravermelho de ondas curtas (1.3 – 2.5 μm) (JORGE; INAMASU, 2014).

Os tipos mais comuns de dispositivos de sensoriamento remoto usados para fenotipagem de plantas incluem sensores multiespectrais, hiperespectrais, de fluorescência e térmicos ou imageadores usando a radiação refletida ou emitida pelo dossel, além disso, as câmeras digitais vermelho-verde-azul (RGB) são amplamente utilizadas, na verdade, a maioria das abordagens atuais de baixo custo para fenotipagem são baseadas na exploração imagens por RGB (ARAUS *et al.*, 2018).

O uso de sensoriamento remoto com drones (ou UAVs) fornece uma plataforma flexível, adquirindo rapidamente dados em grandes áreas e potencialmente fornecendo imagens de alta resolução espacial (± 1 mm por pixel). As aplicações desta tecnologia incluem: detecção de estresse na planta (THENKABAIL *et al.*, 2004), medir o conteúdo de clorofila das plantas (BLACKBURN; FERWERDA, 2008), identificar diferenças na porcentagem de cobertura vegetal verde (CHEN *et al.*, 2008), extração bioquímica variáveis como nitrogênio e lignina (BLACKBURN; FERWERDA, 2008; DALPONTE *et al.*, 2009), discriminar os tipos de cobertura do solo (THENKABAIL *et al.*, 2004), detecção de variações de umidade da cultura

(COLOMBO *et al.*, 2008), detecção sutil variações nas concentrações de pigmento da folha (YANG *et al.*, 2009, ZHAO *et al.*, 2007), modelagem de características biofísicas e de rendimento de culturas agrícolas (THENKABAIL *et al.*, 2000; HOUBORG *et al.*, 2009), melhorar a detecção de mudanças na vegetação esparsa (LYON *et al.*, 1998), e avaliar o conteúdo absoluto de água nas folhas das plantas (JOLLINEAU; HOWARTH, 2008). Desta forma é possível vislumbrar as capacidades experimentais e aplicações operacionais de uso de imagens.

No campo da ciência das plantas, Fiorani e Schurr (2013) se referem à fenotipagem de plantas como o conjunto de metodologias e protocolos usados para medir com precisão o crescimento, a arquitetura e a composição das plantas em diferentes escalas. Os melhoristas e agricultores, desde os primórdios, têm feito seleções com base em fenótipos muito antes da descoberta do DNA e marcadores moleculares. O desenvolvimento de uma cultivar se baseia na realização de cruzamentos, para a obtenção de progênies e a avaliação em diferentes ambientes, assim procedendo a seleção de indivíduos superiores. Os melhoristas de plantas querem ser capazes de fenotipar grandes números de genótipos e em diferentes ambientes, e assim identificarem com rapidez e precisão a melhor progênie, associando a isto, uma melhor otimização dos recursos, e principalmente buscando a redução de custos.

O ganho genético dentro de um programa de melhoramento pode ser acelerado de várias maneiras, incluindo: aumentar o tamanho do programa de melhoramento para permitir maior intensidade de seleção, aumentar a precisão da seleção (maior repetibilidade), assegurar uma variação genética adequada, acelerar os ciclos de reprodução, e melhorar as ferramentas de apoio à decisão. Em todos esses componentes do *pipeline* de reprodução, a fenotipagem de precisão de alto rendimento confiável está envolvida de maneira direta ou indireta.

O aumento da precisão e obtenção de estimativas precisas nas avaliações dos ensaios é fundamental para o melhoramento genético. Muitas avaliações de rotina, como *stand* de plantas, fenologia, severidade do estresse abiótico, severidade e progressão da doença, altura de plantas, data de floração, alojamento e componentes de produção permanecem amplamente manuais em programas de melhoramento, particularmente no setor público (MASUKA *et al.*, 2017). As medições manuais são mais trabalhosas e carecem de robustez ou repetibilidade. Remover o erro e a subjetividade dessas medidas a um custo reduzido promoveria uma economia direta para os programas de melhoramento. Além disso, as avaliações visuais, baseadas a olho nu, podem não capturar adequadamente o estado fisiológico das plantas (ARUS *et al.*, 2018). Com o desenvolvimento de ferramentas de fenotipagem de alto rendimento para medir

quantitativamente as principais características, especialmente entre locais, aumentará a precisão da seleção a um custo mais baixo.

A adoção de ferramentas de alto rendimento recentemente desenvolvidas, realizada por plataformas fenotípicas terrestres e aéreas, pode envolver um grande investimento inicial. Existe uma ampla gama de opções para o uso de imagens RGB para gerar índices de vegetação e outras aplicações no monitoramento de culturas, juntamente com plataformas flexíveis que são facilmente implantáveis, além de que, algumas ferramentas também podem ser instaladas como aplicativos em telefones celulares. Vale ressaltar também que as medições manuais consomem tempo e mão de obra, assim a aplicação de ferramentas de fenotipagem pode reduzir significativamente estes requisitos (CONFALONIERI *et al.*, 2017). Um exemplo, é a taxa de medições manuais da altura da planta em arroz (*Oryza sativa* L.) que foi estimada em 45 parcelas por hora, em comparação com 3.000 parcelas por hora usando um fenomóvel equipado com um sensor ultrassônico de altura do dossel (TANGER *et al.*, 2017).

A herdabilidade, no sentido amplo, é uma medida da variação genética em comparação com a variação ambiental, e é estimada pela razão da variância genética pela variância fenotípica, com a variância fenotípica sendo a combinação de uma parte genética e outra ambiental. Os erros experimentais aumentam a variância ambiental e, portanto, diminuem a estimativa de herdabilidade. Esses erros vêm em grande parte da variabilidade do microclima, do manejo inconsistente da cultura e da fertilidade do solo, eventos imprevisíveis, como insetos, doenças, ervas daninhas, microrganismos, plantas e animais indesejáveis, ventos, tempestades de chuva e granizo, e as diferenças causadas por experimentadores e agricultores em sua observação, medição e produção. Eles podem ser minimizados através de várias abordagens, como a seleção cuidadosa do local de ensaio, materiais experimentais, práticas agrônômicas, projeto experimental apropriado e outras técnicas (XU *et al.*, 2012; KLUKAS *et al.*, 2014).

A caracterização e medição dos fatores ambientais fornecem a base para refinar os experimentos de campo. Sendo assim, a análise de um conjunto de dados provenientes de diferentes experimentos muitas vezes sofre de uma falta de informações ambientais consistentes, o que torna impossível analisar e modelar as diferenças no comportamento dos genótipos (TARDIEU, 2013; POORTER, 2012). Uma caracterização ambiental completa está sendo facilitada pelo rápido progresso na tecnologia de sensores. Sensores de baixo custo agora podem ser colocados em redes sem fio para caracterizar o microambiente de muitos órgãos em uma planta ou muitas plantas em um dossel. Isso se aplica progressivamente à caracterização do ambiente do solo pela combinação de sensores de solo com modelagem (VERECKEN *et al.*, 2016).

Essas informações locais podem ser aumentadas para toda a plataforma, campo ou níveis regionais usando imagens locais, UAV ou de satélite, respectivamente. Isso permite um mapeamento eficiente de variáveis ambientais, caracterizando e capturando os efeitos da variação espacial e temporal das condições de crescimento detectadas por plantas ou campos individuais (TARDIEU *et al.*, 2017).

A intensidade da seleção, é determinada pela taxa de seleção e a porcentagem das amostras selecionadas de uma população. Dessa forma, com o aumento da intensidade de seleção, os ganhos dentro de um programa de melhoramento serão maiores. Para aumentar a intensidade da seleção, precisamos aumentar a escala experimental, porém a variabilidade genética poderá ser reduzida, o que não é desejável. Entretanto, o uso de ferramentas que permitem avaliar uma grande quantidade de genótipos, a exemplo da fenômica, permite aumentar a intensidade de seleção sem grandes prejuízos à variabilidade (FRITSCHÉ NETO, R.; BORÉM, 2015).

Posteriormente, a integração de abordagens convencionais de melhoramento com fenotipagem de grande escala e precisão, e um certo nível de genotipagem em alguns casos, é necessária para identificar genótipos que expressam a característica alvo. Portanto, trabalhar com grandes populações torna-se cada vez mais importante para programas de melhoramento e estudos genéticos que contribuirão para a detecção da variação genética, mapeamento de genes e resposta de seleção. Sendo que, métodos de alto rendimento são necessários para avaliação de populações maiores de forma eficiente (XU *et al.*, 2017).

A aplicação de ferramentas de fenotipagem de alto rendimento atreladas ao baixo custo, permitirá que recursos, dentro de um programa de melhoramento, sejam alocados para geração e gestão de populações maiores, possibilitando um aumento na intensidade de seleção dentro de um orçamento fixo. As ferramentas de sensoriamento remoto permitem a avaliação dos componentes fisiológicos da produção que estão clara e conceitualmente relacionados à produtividade da cultura, a adaptação e eficiência de uso, somando-se a uma agilidade precisão na coleta de dados a campo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local

Foi avaliado a maturação absoluta de cultivares de experimentos instalados em dois locais:

a) Área experimental no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária (CDCT) da Universidade Federal de Lavras - UFLA, localizada a uma altitude de 954 m, 21°12'11'' de latitude Sul, e 44°58'47'' de longitude Oeste, no município de Lavras - MG.

b) Área experimental no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária (CDTT) da Universidade Federal de Lavras - UFLA, localizada a uma altitude de 920 m, de 21°09'24'' de latitude Sul, e 44°55'34'' longitude Oeste, no município de Ijaci - MG.

Os experimentos foram conduzidos em diferentes anos agrícolas, sendo a combinação de locais e safras, denominados de ambientes (TABELA 1).

Tabela 1 - Correspondência dos diferentes ambientes, anos de condução dos experimentos e locais.

AMBIENTE	LOCAL	MUNICÍPIO	ANO
E1	CDCT - UFLA	LAVRAS - MG	2016/2017
E2	CDCT - UFLA	LAVRAS - MG	2017/2018
E3	CDCT - UFLA	LAVRAS - MG	2018/2019
E4	CDTT - UFLA	IJACI - MG	2019/2020
E5	CDCT - UFLA	LAVRAS - MG	2021/2022
E6	CDTT - UFLA	IJACI - MG	2021/2022

Fonte: Do autor, 2023.

3.2 Tratamentos genéticos

Um grupo de 54 cultivares comerciais de soja foram utilizadas. Estas, pertencem às seguintes empresas Monsoy, DuPont Pioneer, Syngenta, Nidera, CCGL-Tec, Brasmax, INT – Sementes, Agroeste, Tropical Melhoramento Genético (TMG), DonMario, e Embrapa (TABELA 2).

Tabela 2 - Relação dos genótipos de soja, respectivas informações de grupo de maturação (G.M.) e representação no ambiente.

CULTIVARES	GM	AMBIENTE					
		E1	E2	E3	E4	E5	E6
M5410IPRO	5.4	X					
P95R51	5.5	X	X	X	X	X	X
BRS5601RR	5.6		X		X	X	X
M5705IPRO	5.7		X	X	X	X	X
BRS5804RR	5.8				X	X	X
DM58i	5.8		X	X	X	X	X
AS3590IPRO	5.9				X	X	X
INT5900	5.9	X					
M5947IPRO	5.9		X	X	X	X	X
NA5909RG	5.9	X	X				
NK7059RR	5.9	X					
SYN1359IPRO	5.9	X					
BS2606IPRO	6.0				X	X	X
TEC6029IPRO	6.0	X					
AS3610IPRO	6.1	X	X	X	X	X	X
BMX6160IPRO	6.1	X	X	X	X	X	X
INT6100	6.1	X					
SYN1361IPRO	6.1					X	X
BRS6203RR	6.2		X	X	X		
M6210IPRO	6.2		X	X	X	X	X
TMG7062IPRO	6.2	X					
BRS1001IPRO	6.3	X				X	X
DM6563IPRO	6.3	X					
INT6300RR	6.3		X	X			
INT7100IPRO	6.3		X	X	X	X	X
BRS1003IPRO	6.4				X	X	X
BRS388RR	6.4	X	X	X		X	X
CS26B42IPRO	6.4				X		
M6410IPRO	6.4	X	X	X	X	X	X
SYN15640IPRO	6.4				X	X	X
BMXPOTENCIARR	6.7	X	X	X	X	X	X
INT7200IPRO	6.7				X	X	X
TMG7067IPRO	6.7				X	X	X
AS3680IPRO	6.8		X	X	X	X	X
M6972IPRO	6.9	X					
P96Y90	6.9				X	X	X
M7110IPRO	7.1		X	X			
ST721IPRO	7.2				X	X	X
8473RSFRR	7.3		X		X	X	X
AS3730IPRO	7.3	X	X	X			
TMG2173IPRO	7.3				X	X	X
ANTA82RR	7.4	X	X	X			
BRS1074IPRO	7.4				X	X	X
M7739IPRO	7.7		X	X			
TEC7849IPRO	7.8	X					
81I84RSFIPRO	8.1		X		X	X	X
P98Y12	8.1		X	X			
CZ48B32IPRO	8.3				X	X	X
P98Y30	8.3		X	X	X	X	X
TMG2185IPRO	8.5		X	X	X	X	X
P98Y70	8.7		X	X	X	X	X
M8808IPRO	8.8		X	X			
M9144RR	9.1		X	X			

Fonte: Do autor, 2023.

3.3 Condução dos experimentos

Nos anos agrícolas 2016/2017, 2017/18, 2018/2019, 2021/22 os experimentos foram conduzidos adotando o delineamento de blocos casualizados completos com duas repetições e parcela de quatro linhas de cinco metros. No ano agrícola 2019/20 adotou-se três repetições. O delineamento experimental e o tamanho da parcela foram os mesmos.

Na adubação de base foi utilizado 350 kg.ha⁻¹ de NPK (02-30-20), aplicado no sulco de semeadura. A inoculação via sulco foi realizada com as cepas bacterianas de *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 e SEMIA 5080, na dose de 18 mL.Kg⁻¹ de sementes. Os demais tratamentos culturais foram realizados de acordo com a necessidade da cultura, empregando procedimento semelhante ao relato por Soares *et al.* (2020).

Procedeu-se a avaliação do caráter dias para maturação absoluta, quando 95% das plantas da parcela encontravam-se em estágio R8, ou seja, onde 95% das vagens apresentando coloração madura.

3.4 Análise estatística dos dados fenotípicos

De posse dos dados obtidos, estes foram submetidos a análise exploratória para verificar a normalidade pelo teste de Shapiro e Wilk (1965), e tratamento de outliers. Três estratégias foram adotadas para modelar o efeito da maturação absoluta para a estimativa da maturidade relativa dos genótipos.

3.4.1 Análise estatística – Método multiambiente (MET)

Para o ajuste do grupo de maturação, foi realizado a análise de variância conjunta dos dados referentes ao ano agrícola 2021/2022 dos experimentos conduzidos no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária (CDCT) - UFLA em Lavras-MG e Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária (CDTT) - UFLA em Ijaci-MG.

As análises individuais por ambiente para o caráter avaliado na safra 2021/22 foram realizadas adotando o modelo apresentado:

$$y_{ij} = \mu + g_i + b_j + e_{ij} \quad (1)$$

em que:

y_{ij} : valor observado referente a parcela que recebeu a genótipo i no bloco j ;

μ : constante associada a toda observação;

g_i : efeito da cultivar i;

b_j : efeito do bloco j;

e_{ij} : erro associado a cultivar i no bloco j.

Para verificar a possibilidade de realização da análise conjunta foi realizado o teste de Hartley (1950) para verificar a homogeneidade das variâncias residuais por ambiente. A análise conjunta envolvendo os dois locais (Lavras e Ijaci) na safra 2021/22, foi adotada segundo a metodologia de modelos mistos (THOMPSON *et al.*, 2003), sendo o modelo estatístico:

$$y_{ijk} = \mu + a_k + b_{j(k)} + g_i + g_{a_{ik}} + e_{ij(k)} \quad (2)$$

em que:

Y_{ijk} : valor observado referente a parcela que recebeu o genótipo i no bloco j no ambiente k.

μ : constante associada a toda observação;

a_k : efeito do ambiente k, assumido como efeito fixo;

$b_{j(k)}$: efeito do bloco j no ambiente k, assumido como efeito aleatório;

g_i : efeito da cultivar i, assumido como efeito aleatório;

$g_{a_{ik}}$: efeito da interação genótipo x ambientes, assumido como efeito aleatório;

$e_{ij(k)}$: erro associado a cultivar i no bloco j no ambiente k.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância com o auxílio da linguagem de programação R Development Core Team (2016). A análise conjunta foi realizada por meio do método da Máxima Verossimilhança Restrita (REML), com teste de significância do efeito fixo pelo valor F, e dos efeitos aleatórios pelo teste da razão de verossimilhança (LRT). A precisão experimental foi aferida por meio da estimativa do CV (Coeficiente de Variação) e da acurácia (RESENDE; DUARTE, 2007), de acordo com os estimadores:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100 \quad (3)$$

em que:

CV: é o coeficiente de variação expresso em porcentagem;

σ : é o desvio padrão do erro experimental;

X: é a média do caráter.

(4)

$$h^2 = \left[\frac{\sigma_g^2 + \sigma_{ge}^2/b}{\sigma_g^2 (\sigma_{ge}^2 + /b) + \sigma_g^2/b} \right]$$

(5)

$$r_{g\hat{g}} = \sqrt{h^2}$$

em que:

h^2 : herdabilidade;

$r_{g\hat{g}}$: acurácia;

b: número de repetições;

σ_e^2 : variância do erro;

σ_g^2 : variância genotípica.

3.4.2 Análise estatística – Método fenotipagem de alto rendimento

Para a estimativa do grupo de maturação, através da fenotipagem de alto rendimento foram utilizados dados do ano agrícola 2021/2022 do experimento conduzido no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária (CDCT) - UFLA em Lavras-MG.

As imagens foram coletadas usando o drone DJI Phantom 4 Pro Advanced (DJI Technology Co., Ltd.) equipado com câmera digital vermelho-verde-azul (RGB). Os voos foram realizados, no período compreendido entre 10:00 da manhã à 13:00 da tarde. Todas as missões de voo foram realizadas a uma altitude de 30 m com uma velocidade aproximada de 5 m/s. As imagens apresentaram uma distância de amostragem do solo (GSD) de aproximadamente 0,80 a 0,85 cm e com recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 70%, *waypoints* e rotas aéreas foram gerados automaticamente usando o software de planejamento de voo, Pix4Dcapture (v4.8.0; Pix4D, Prilly). Foi utilizado um tablet para preparar as missões de voo em campo, que foram então carregados para a placa de controle principal na UAS antes do voo. Durante cada voo, o UAS percorreu uma rota predeterminada através do modo de voo autônomo do software.

Painéis planos de pvc (50 × 50 cm) foram colocados como pontos de controle de solo permanente (GCPs) para ajudar a garantir um georreferenciamento preciso das imagens. Os GCPs foram colocados nos vértices da área experimental em campo. O georreferenciamento foi realizado utilizando o instrumento GNSS RTK em que foram coletados 4 pontos pré-

definidos. Os pontos foram rastreados e fixados em campo em modo cinemático com margem de erro inferior a 0,03 m usando um par de antenas GNSS de precisão Spectra, operando no modo RTK com base e rover.

Nesse tipo de georreferenciamento utilizando RTK, dois receptores são usados para coletar dados de forma contínua. Um dos receptores, chamado de estação de referência (base), está posicionado sobre um ponto de coordenadas conhecidas. O outro receptor (receptor móvel) é utilizado para coletar dados e pontos de interesse para o usuário e determinar a posição em tempo real (BARBOSA *et al.*, 2013). O modelo de rastreamento do RTK proporciona alta velocidade e precisão na determinação da posição geográfica e altitude elipsoidal. Portanto, usando RTK é possível obter o desnível geométrico de um alinhamento com referência ao geóide local (VITTI *et al.*, 2017).

Foi utilizado o software Agisoft Photoscan 1.4 (Agisoft LLC, São Petersburgo, Rússia), em que, as referências espaciais foram inicialmente corrigidas com especificações para SIRGAS 2000 UTM 23S. Em seguida, procedeu-se o alinhamento das imagens (triangulação e medição automática de pontos de cruzamento e conexões via correlação automática de imagens), construção de uma nuvem densa de pontos, construção da textura da imagem, modelagem digital do terreno baseada no DEM, ortorretificação das imagens e confecção do ortomosaico final.

Os pontos obtidos através do levantamento topográfico (GNSS RTK) foram interpolados para software ArcGis 10.1 (Esri, 2013) para obter a superfície de estudo denominada “controle”. A partir do ortomosaico, as informações de fundo de solo e outras, foram removidas usando limites de cores, em que, após a remoção do fundo, as parcelas de soja foram segmentadas a partir do ortomosaico, criando grides para o cálculo de índices de vegetação.

Para avaliar e monitorar a fenologia da cultura, adotou-se índices de vegetação, em que tais índices de vegetação consistem em operações algébricas de valores obtidos de diferentes bandas do espectro, nas regiões do visível, também chamadas de bandas espectrais. A escolha dos índices de vegetação, dentre os diversos existentes na literatura, foi baseada nas bandas espectrais disponíveis na câmera e de acordo com a finalidade para qual foi desenvolvido. O MPRI (*Modified Photochemical Reflectance Index*), foi calculado usando a ferramenta “calculadora raster” do QGIS. Após o cálculo, o valor médio foi extraído de um *buffer* de 0,8 m de diâmetro de cada parcela amostrada usando a ferramenta “estatísticas por zona”. Logo após foi realizada a análise de variância.

Equação do índice de vegetação:

(6)

$$MPRI = \frac{(G - R)}{(G + R)}$$

O índice MPRI (Tucker,1979): é utilizado para a identificação de níveis de clorofila, biomassa e teor de água nas plantas.

Assim como:

(7)

$$r = \frac{R}{R + G + B}, g = \frac{G}{R + G + B}, b = \frac{B}{R + G + B}$$

Tendo os parâmetros das equações são: Red (630-685 nm), Green (520-590 nm), Blue (440-510 nm), segundo Mulla (2012).

A análise estatística dos valores de refletância obtidos por parcela foi realizada utilizando o modelo de parcela subdividida no tempo pela teoria de modelos mistos, apresentado pela equação oito, em que a nível de parcela foram considerados das datas de realização dos voos para a detecção do ponto de maturação exato de cada cultivar em nível de subparcela as diferentes cultivares avaliadas, adotando o modelo apresentado:

(8)

$$Y_{ijk} = \mu + g_i + b_j + v_k + bg_{jk} + gv_{ik} + e_{ij}$$

em que:

Y_{ij} : valor observado referente a parcela que recebeu a genótipo i no bloco j;

μ : constante associada a toda observação;

g_i : efeito do genótipo i;

b_j : efeito do bloco j;

v_k : efeito do voo k, assumido como fixo;

bg_{ij} : efeito da interação bloco j com a cultivar i, assumido como aleatório;

gv_{ik} : efeito da interação cultivar i no voo k, assumido como aleatório; e

e_{ij} : erro associado a cultivar i no bloco j.

Os dados obtidos pelo modelo foram submetidos a análise de regressão polinomial quadrática (EQUAÇÃO 9), sendo então determinado o ponto de mínimo (equação y) das

parábolas para identificar a valor mínimo do índice MPRI que corresponde a maturação absoluta e o DAP (dias após o plantio) correspondente em função do modelo gerado (Figura suplementar x) que foi então utilizado para estimar o G.M de cada cultivar avaliada.

(9)

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \varepsilon_i$$

(10)

$$x_i = \frac{-\beta_1}{2 * \beta_2}$$

Em que:

y_i : representa o valor da variável resposta ou dependente, y , na observação i , $i = 1, \dots, n$ (aleatória);

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

ε_i : $i = 1, \dots, n$ são variáveis aleatórias que correspondem ao erro (variável que permite explicar a variabilidade existente em Y e que não é explicada por X);

β_0 ; β_1 e β_2 correspondem aos parâmetros do modelo.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância com o auxílio do software computacional R Development Core Team (2016). A precisão experimental foi aferida por meio da estimativa do CV (Coeficiente de Variação) e da acurácia (RESENDE; DUARTE, 2007), de acordo com os estimadores:

(11)

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100$$

em que:

CV: é o coeficiente de variação expresso em porcentagem;

σ : é o desvio padrão do erro experimental;

\bar{X} : é a média do caráter.

(12)

$$h^2 = \left[\frac{\sigma_p^2}{\sigma_g^2 + (\sigma_{gc}^2/q) (\sigma_{gj}^2 / b) + \left(\frac{\sigma_e^2}{qb}\right)} \right]$$

(13)

$$r_{g\hat{g}} = \sqrt{h^2}$$

em que:

$r_{g\hat{g}}$: acurácia;

b: número de repetições;

σ_e^2 : variância do erro;

σ_g^2 : variância genotípica.

3.4.3 Análise estatística – Método de fator analítico multiplicativo misto (FAMM)

Para o método FAMM foram utilizados dados de maturação absoluta dos seguintes anos agrícolas 2016/2017, 2017/2018, 2018/2019 (experimento conduzido na Fazenda Muquém em Lavras-MG), 2019/2020 (experimento conduzidos na Fazenda Palmital em Ijaci-MG) e 2021/2022 (experimentos conduzidos na Fazenda Muquém em Lavras-MG e Fazenda Palmital em Ijaci-MG) perfazendo seis ambientes.

As análises individuais para cada ambiente para o caráter avaliado nos seis ambientes foram realizadas adotando o modelo apresentado:

$$y_{ij} = \mu + g_i + b_j + e_{ij} \quad (14)$$

em que:

y_{ij} : valor observado referente a parcela que recebeu a genótipo i no bloco j;

μ : constante associada a toda observação;

g_i : efeito do genótipo i;

b_j : efeito do bloco j;

e_{ij} : erro associado a cultivar i no bloco j.

A análise conjunta dos genótipos nos seis ambientes foi realizada segundo a metodologia de modelos mistos (THOMPSON *et al.*, 2003):

$$Y = X\beta + Z\tau + \varepsilon \quad (15)$$

com as seguintes distribuições e estruturas de medias e variâncias:

$$\tau \sim N(0, G)$$

$$E(y) = X\beta$$

$$\varepsilon \sim N(0, R)$$

$$\text{Var}(y) = V = ZGZ + R$$

em que:

Y: é o vetor de observações da característica avaliadas;

B: é o vetor dos efeitos de fixos com matriz de incidência X;

τ : é o vetor dos efeitos aleatórios com matriz de incidência Z; e

ε : é o vetor de erros ou resíduos aleatórios.

G: matriz de covariância de efeitos aleatórios.

R: matriz de variância de erros.

0: vetor nulo.

O modelo FAMM foi realizado segundo proposto por Smith *et al.*, (2001) e Resende e Thompson (2004). Na análise de experimentos multiambientes, a análise de fatores pode ser usada para fornecer uma classe de estruturas para a matriz de variância-covariância do efeito do genótipo i no ambiente j . Para o modelo FAMM, o vetor de efeitos aleatórios é postulado em termos dos efeitos dos genótipos não observáveis em diferentes ambientes, sendo dado por:

$$\tau_{ij} = \sum_{r=1}^k \lambda_{jr} f_{ir} + \delta_{ij} \quad (16)$$

τ_{ij} : efeito do genótipo i no ambiente j ;

λ_{jr} : carregamento para fator r no ambiente j ;

f_{ij} : pontuação para genótipo i no fator r ;

δ_{ij} : erro representando a falta de ajuste do modelo.

Aplicando aos efeitos a i genótipos em ambientes j , o modelo analítico de fatorial postula a dependência de um conjunto de fatores hipotéticos aleatórios $f_r^{(gx1)}$, ($r=1...K < s$).

A distribuição conjunta de f e δ é dada por:

$$\begin{pmatrix} f \\ \delta \end{pmatrix} \sim N \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} I_k & 0 \\ 0 & \Psi \end{pmatrix} \right]$$

Em que:

Ψ : é a diagonal de variâncias específicas;

Ψ_i : representa a variância específica para o i -ésimo ensaio.

Isto implica que todas as covariâncias entre os níveis de u são devidos aos fatores comuns, enquanto os fatores específicos explicam a variação adicional de elementos individuais de u (MEYER *et al.*, 2009).

Os fatores podem ser não ou correlacionados. As variáveis são agrupadas por meio de suas correlações, ou seja, aquelas pertencentes a um mesmo grupo serão fortemente correlacionadas entre si, mas pouco correlacionadas com as variáveis de outro grupo. Cada grupo de variáveis representará um fator (JOHANSON; WICHERN, 2007).

O modelo apresenta distribuição com estrutura de médias e variâncias para os efeitos aleatórios como $u \sim N(0, A \otimes \Sigma)$, onde A é a matriz de parentesco e Σ é a matriz de variância-covariância genética, que é dada por:

$$\Sigma = \Lambda \Lambda' + \Psi \quad (17)$$

Sendo:

$$\Lambda \Lambda' = V D V \quad (18)$$

Onde V refere-se a matriz de autovetores e D é a matriz diagonal dos autovalores.

Para análise de múltiplos experimentos, a abordagem da análise de fatores pode ser usada para propiciar uma classe de estruturas para a matriz de variância e covariância Σ , associadas aos efeitos de u . O modelo para os efeitos de genótipos em cada ambiente conduz a um modelo para Σ , no qual a variância genotípica no ambiente j (Equação 6), a covariância genotípica entre os ambientes j e j' (Equação 7) e a correlação genotípica entre os ambientes j e j' (Equação 8) são dadas por:

O modelo de efeitos genótipos em cada ambiente leva a um modelo, em que:

$$\sigma_{gjj} = \sum_{r=1}^k \lambda_{jr}^2 \Psi_j : \text{variância do genótipo no ambiente } j; \quad (19)$$

$$\sigma_{gjj'} = \sum_{r=1}^k \lambda_{jr} \lambda_{j'r} : \text{covariância do genótipo entre os ambientes } j \text{ e } j' \quad (20)$$

$$\rho_{gijj'} = \sum_{r=1}^k \lambda_{jr} \lambda_{j'r} / \left[\left(\sum_{r=1}^k \lambda_{jr}^2 \Psi_j \right) \left(\sum_{r=1}^k \lambda_{j'r}^2 \Psi_{j'} \right) \right] : \text{correlação genotípica entre os ambientes } j \text{ e } j' \quad (21)$$

O modelo FAMM produz uma equação de uma regressão aleatória de genótipos em k covariáveis ambientais em que todas interceptam a origem. Os BLUPs dos escores fatoriais dos genótipos em cada ambiente (f_s) podem ser obtidos por:

$$f_s = [\Lambda'(\Lambda\Lambda' + \Psi)^{-1} \otimes I_g] \tilde{u}_g \quad (22)$$

Onde são cargas fatoriais estimadas; é matriz diagonal das variâncias específicas estimadas e u_g é o efeito de genótipo em cada ambiente. Também os BLUPs dos resíduos das interações GA podem ser obtidos por:

$$\delta = [\Psi^{-1}(\Lambda\Lambda' + \Psi)^{-1} \otimes I_g] \tilde{u}_g \quad (23)$$

Pode ser visto que o modelo fator analítico requer estimativa dos parâmetros Λ e Ψ , os quais compõem a matriz de variância-covariância, e podem ser estimados por REML através do algoritmo de informação média (AI) (THOMPSON *et al.*, 2003).

3.5 Análise de regressão

A análise do modelo de regressão linear simples, para a estimação dos grupos de maturidade relativa, segue a seguinte equação:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad (24)$$

em que:

y_i : representa o valor da variável resposta ou dependente, y , na observação i , $i = 1, \dots, n$ (aleatória);

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

ε_i : $i = 1, \dots, n$ são variáveis aleatórias que correspondem ao erro (variável que permite explicar a variabilidade existente em Y e que não é explicada por X);

β_0 e β_1 correspondem aos parâmetros do modelo.

O parâmetro β_0 representa o ponto em que a reta regressora corta o eixo dos y quando $x = 0$ e é chamado de intercepto ou coeficiente linear.

O parâmetro β_1 representa a inclinação da reta regressora, expressando a taxa de mudança em Y, ou seja, indica a mudança na média da distribuição de probabilidade de Y para um aumento de uma unidade na variável X.

O modelo regressão, para o ajuste do G.M. foi estabelecida utilizando as cultivares P95R51, M5705IPRO, AS3610IPRO, M6410IPRO, P96Y90, BMXPOTÊNCIA, TMG2173IPRO, 8473RSFRR, P98Y30 e P98Y70 como testemunhas, isto é, cultivares padrão de G.M. conhecido e pouca variação, em que, obteve-se um ajuste do modelo de $R^2 = 95,0\%$ (SILVA *et al.*, 2021). Sendo assim, o modelo permite inferir estimativas do G.M. para as cultivares na região sul de Minas Gerais com elevada acurácia, isto é, confiabilidade na estimativa deste índice.

Equação de regressão:

$$Y = -7,2909 + (0,1064x) \quad (25)$$

em que:

Y: grupo de maturação relativa estimado;

x: número de dias para a maturação absoluta.

3.6 Eficiência das estratégias de classificação de estimação dos grupos de maturidade relativa

A coincidência de cada procedimento, foi calculada a partir dos G.Ms obtidos em cada método com o informado no RNC, assim como a correlação de Spearman, e pela seleção de 50% das cultivares precoces e 50% das cultivares tardias, adotando o índice de coincidência proposto por Hamblin e Zimmermann (1986). Também foi estimada a correlação de Spearman.

$$IC (\%) = \frac{(A - C)}{(M - C)} \times 100 \quad (26)$$

Em que:

A: número de cultivares coincidentes

M: números de cultivares selecionadas

C: quantifica o número de cultivares coincidentes devido ao acaso.

4 RESULTADOS

Para a análise individual dos ambientes (Tabela 1A), para a primeira estratégia de estimação, ou seja, método multiambientes (MET), as estimativas de acurácia (rgg) e do coeficiente de variação experimental (CVe), refletem a precisão experimental. É possível observar que houve diferença significativa para dias para maturação, fato este fundamental para a condução deste trabalho.

Sendo atendido os pressupostos, de normalidade e variâncias homogêneas, procedeu-se a análise de variância conjunta. Considerando a análise conjunta dos dois locais, a precisão experimental foi aferida pelo coeficiente de variação experimental, este foi de 2,1%, enquanto a acurácia foi de 98% (Tabela 3). Considerando estes parâmetros, pode-se inferir que a precisão experimental para o caráter estudado foi de alta precisão. Observou-se diferença significativa para as fontes de variação, cultivares e ambientes, e para a interação G x A, para o caráter avaliado.

Tabela 3 – Resumo da análise conjunta utilizando o modelo de análise multiambientes, para variável dias para maturação.

Ambiente (A)		Cultivares (C)		A x C	
GL	QM – (Pr > F)	GL	LRT – (Pr > Chisq)	GL	LRT – (Pr > Chisq)
1	320,13 *	29	86,15*	28	4,54*
CVe (%) = 2,1					
Acurácia (%) = 98,0					

* Significativo a 0,05 de probabilidade para o teste *F* de Fisher-Snedecor (QMF) e para o qui-quadrado (LRT – A x L).

Fonte: Do autor, 2023.

As médias das 30 cultivares para o caráter dias para maturação estão apresentadas na Tabela 4. Observou-se uma variação de 36 dias entre as cultivares, sendo a cultivar P95R51 a mais precoce, com 119 dias e a cultivar TMG2185IPRO a mais tardia, com 155 dias.

A partir da equação de regressão (EQUAÇÃO 21) foi estimado o grupo de maturação relativo ajustado (GMR), para as cultivares avaliadas (Tabela 6). As cultivares M6210IPRO e TMG2185IPRO foram as que apresentaram maior variação no ajuste do grupo de maturação, sendo o G.M descrito no registro nacional de cultivares (RNC) 6.2 e 8.5, respectivamente. Entretanto, o grupo de maturação ajustado foi de 7.0 para M6210IPRO e 9.3 para a TMG2185IPRO. A correlação de Pearson foi 0,94 de alta magnitude, evidenciando bom ajuste da estratégia utilizada.

Tabela 4 -Valores do grupo de maturidade relativa estabelecidos por regressão, utilizando a metodologia de multiambientes.

Genótipos	Médias Ajustadas (Dias)	G.M RNC	G.M MET	Δ^1
95R51	119,0	5.5	5.4	-0.1
BRS5601RR	120,5	5.6	5.5	-0.1
M5705IPRO	126,9	5.7	6.2	0.5
BRS5804RR	122,0	5.8	5.7	-0.1
DM5.8i	119,8	5.8	5.5	-0.3
AS3590IPRO	126,4	5.9	6.2	0.3
M5947IPRO	130,3	5.9	6.6	0.7
BS2606IPRO	127,1	6.0	6.2	0.2
6160RSFIPRO	124,7	6.1	6.0	0.0
AS3610IPRO	129,6	6.1	6.5	0.4
BRS6203RR	124,4	6.2	5.9	-0.3
M6210IPRO	134,7	6.2	7.0	0.8
BRS1003IPRO	128,3	6.4	6.4	0.1
M6410IPRO	131,0	6.4	6.7	0.3
Syn15640IPRO	132,3	6.1	6.8	0.4
INT7100IPRO	130,5	6.3	6.6	0.2
AS3680IPRO	127,4	6.8	6.3	-0.5
INT7200IPRO	135,2	6.7	7.1	0.4
BMXPOTENCIARR	129,8	6.7	6.5	-0.2
TMG7067IPRO	130,3	6.7	6.6	-0.1
96Y90	131,8	6.9	6.7	-0.2
ST721IPRO	135,2	7.2	7.1	-0.1
TMG2173IPRO	135,2	7.3	7.1	-0.2
BRS1074IPR	138,4	7.4	7.4	0.0
8473RSFRR	136,4	7.3	7.2	-0.1
81I84RSFIPRO	147,9	8.1	8.4	0.3
98Y30	148,9	8.3	8.6	0.3
CZ48B32IPRO	149,4	8.3	8.6	0.3
TMG2185IPRO	155,5	8.5	9.3	0.8
98Y70	147,2	8.7	8.4	-0.3
Correlação de Pearson 0,94*				

ER: $y = -7,2909 + (0,1064x) R^2 = 0,95$. Grupo de maturação informado no registro nacional de cultivares (G.M RNC) e grupo de maturação estimado pelo método multiambientes (G.M MET). Desvio entre o G.M RNC e G.M MET (Δ^1).

Fonte: Do autor, 2023.

Para o método FAMM, o resumo da análise individual dos ambientes, estão apresentados na Tabela 2A. As estimativas de acurácia e do coeficiente de variação (CVE), exibem a precisão experimental. A partir da análise de variância, é possível observar que houve diferença significativa para o caráter dias para maturação.

Os coeficientes de variação experimental, variaram de 1,88% (E1) a 2,92% (E4), entre os diferentes ambientes. A maior acurácia foi 98,82% (E2) e a menor de 95,03% (E1),

(TABELA 2A). Os pressupostos estatísticos não foram violados para a variável analisada. Assim, obteve-se uma distribuição normal para os dados, via teste de Hartley com $p = 0,37$ ($p > 0,05$), e variâncias residuais homogêneas, via razão entre o maior e o menor quadrado médio do erro (< 7 ; Cruz et al., 2014), de 2,06, permitindo o uso da análise de variância, sem a necessidade de transformação dos dados (STORCK *et al.*, 2016).

Considerando a análise conjunta dos seis ambientes, a precisão experimental aferida pelo CVe foi de 2,33%, enquanto a acurácia de 93%. Considerando estes parâmetros, pode-se inferir que a precisão experimental para o caráter estudado foi alta. Observou-se diferença significativa para as duas fontes de variação, cultivares e ambientes, e para a interação G x A, para o caráter avaliado.

Tabela 5 – Resumo da análise de variância conjunta envolvendo os seis ambientes para a variável dias para maturação absoluta (DPM) utilizando o modelo de análise FAMM.

Ambiente (A)		Cultivares (C)		A x L**	
GL	QM – (Pr > F)	GL	LRT – (Pr > Chisq)	GL	LRT – (Pr > Chisq)
5	1,99 ^{NS}	53	72,398*	307	16,978*
CVe (%) = 2,33					
Acurácia (%) = 93,0					

* Significativo a 0,05 de probabilidade para o teste F de Fisher-Snedecor (QMF) e para o qui-quadrado (LRT – A x L); ^{NS} não significativo para as duas estatísticas.

* Análise com estrutura fator analítico de segunda ordem associado a matriz w .

Fonte: Do autor, 2023.

O modelo FAMM que melhor se ajustou para esse conjunto de dados foi o com dois fatores (FA2), explicando uma variação genotípica total de (81%), sendo que o primeiro fator explicou aproximadamente 41% da variação total e o segundo 40%.

As médias das 54 cultivares, utilizadas no modelo FAMM, para o caráter dias para maturação estão apresentadas na Tabela 10. Observou-se uma variação de 30 dias entre as cultivares, sendo a cultivar P95R51 que apresentou menor ciclo, com 112 dias e a cultivar P98Y70 a que apresentou maior ciclo, com 142 dias.

Através da regressão linear, método adotado para se determinar a maturidade relativa, foi estimado o G.M. para as cultivares avaliadas (Tabela 6). Na maioria dos casos o G.M estimado foi menor do que o informado no RNC. Entretanto, as cultivares, M5410IPRO, AS3590IPRO NA5909RG, INT5900, INT6100, M6210IPRO e TMG2185IPRO foram as que apresentaram, maturação relativa, acima do grupo de maturação descrito no RNC. A correlação de Pearson (0,86), também foi de alta magnitude.

Tabela 6 – Valores do grupo de maturidade relativa estabelecidos por regressão, utilizando a metodologia FAMM (Continua).

Cultivares	Médias ajustadas (dias)	G.M RNC	G.M FAMM	Δ^I
6160RSFIPRO	119,4	6.1	5.4	-0.6
81I84RSFIPRO	140,7	8.1	7.7	-0.4
8473RSFRR	132,3	7.3	6.8	-1.6
ANTA82RR	127,2	7.4	6.2	-0.9
AS3590IPRO	125,2	5.9	6.0	0.1
AS3610IPRO	123,2	6.1	5.8	-0.3
AS3680IPRO	123,0	6.8	5.8	-1.0
AS3730IPRO	126,0	7.3	6.1	-1.2
BMX6160IPRO	112,7	6.1	4.7	-1.4
BMXPOTENCIARR	125,9	6.7	6.1	-0.6
BRS1001IPRO	116,3	6.3	5.1	-1.2
BRS1003IPRO	124,3	6.4	5.9	-0.4
BRS1074IPRO	131,3	7.4	6.7	-0.7
BRS388RR	125,4	6.4	6.0	-1.1
BRS5601RR	119,2	5.6	5.4	-0.2
BRS5804RR	118,3	5.8	5.3	-0.5
BRS6203RR	120,9	6.2	5.6	-0.6
BS2606IPRO	124,0	6.0	5.9	-0.1
CS26B42IPRO	123,9	6.4	5.9	-0.5
CZ48B32IPRO	141,4	8.3	7.8	-0.5
DM58i	116,3	5.8	5.1	-0.7
DM6563IPRO	128,4	6.3	6.4	0.1
INT5900	128,4	5.9	6.4	0.5
INT6300RR	125,2	6.3	6.0	-0.3
INT7100IPRO	125,8	6.3	6.1	-1.0
INT7200IPRO	131,7	6.7	6.7	0.0
M5410IPRO	123,7	5.4	5.9	0.5

Tabela 6 – Valores do grupo de maturidade relativa estabelecidos por regressão, utilizando a metodologia FAMM (Conclusão).

M5705IPRO	118,9	5.7	5.4	0.0
M5947IPRO	123,3	5.9	5.8	-0.1
M6210IPRO	127,4	6.2	6.3	0.1
M6410IPRO	126,7	6.4	6.2	-0.2
M6972IPRO	125,7	6.9	6.1	-0.8
M7110IPRO	122,4	7.1	5.7	-1.4
M7739IPRO	129,9	7.7	6.5	-1.2
M8808IPRO	147,1	8.8	8.4	-0.4
M9144RR	146,7	9.1	8.3	-0.8
NA5909RG	125,7	5.9	6.1	0.2
NK7059RR	125,7	5.9	6.1	-0.3
P95R51	112,7	5.5	4.7	-0.8
P96Y90	125,1	6.9	6.0	-0.9
P98Y12	137,8	8.1	7.4	-0.7
P98Y30	140,8	8.3	7.7	-0.6
P98Y70	142,6	8.7	7.9	-0.8
ST721IPRO	129,9	7.2	6.5	-0.7
SYN1359IPRO	116,3	5.9	5.1	-0.8
SYN1361IPRO	116,3	6.1	5.1	-1.0
SYN15640IPRO	128,6	6.4	6.4	0.0
TEC6029IPRO	121,0	6.0	5.6	-0.4
TEC7849IPRO	133,8	7.8	6.9	-0.9
TMG2173IPRO	128,8	7.3	6.4	-0.9
TMG2185IPRO	148,9	8.5	8.6	0.1
TMG7062IPRO	125,7	6.2	6.1	-0.1
TMG7067IPRO	127,8	6.7	6.3	-0.4
INT6100	131,1	6.1	6.7	0.6

Correlação de Pearson = 0,86*

ER: $y = -7,2909 + (0,1064x)$ $R^2 = 0,95$. Grupo de maturação informado no registro nacional de cultivares (G.M RNC) e grupo de maturação estimado pelo método FAMM (G.M FAMM). Desvio entre o G.M RNC e G.M FAMM (Δ^1).

Fonte: Do autor, 2023.

Para a análise individual, das cultivares utilizadas na fenotipagem de alto rendimento, tabela em anexo (TABELA 3A), as estimativas de acurácia e do coeficiente de variação experimental (C_ve), demonstram uma precisão experimental moderada, de 34,03% e 64%, respectivamente. A partir da análise de variância, é possível observar que, também houve diferença significativa para dias para maturação (TABELA 7).

Tabela 7 - Quadrado médio (QM) das fontes de variação dias após plantio (DAP), Bloco, bloco:DAP e teste de razão de verossimilhança para cultivares (C) e para a Interação Bloco:Cultivar e cultivares com dias após plantio (CxDAP) utilizando o modelo de análise subdividida no tempo para a variável índice Modified Photochemical Reflectance Index (MPRI).

Cultivares (C)			A x C		
FV	GL	QM – (Pr > F)	FV	GL	LRT – (Pr > Chisq)
DAP	4	0,1485*	Cultivares	19	6,7765*
Bloco:DAP	4	0,0008*	Bloco:Linhagens	19	37,4519*
Bloco	1	0,0161*	LxDAP	76	17,9703*

CVe (%) 34,03

Acurácia (%) 64,0

* Significativo a 0,05 de probabilidade para o teste *F* de Fisher-Snedecor (QMF) e para o qui-quadrado (LRT – A x L).

Fonte: Do autor, 2023.

As médias preditas pelo índice de vegetação das 20 cultivares para o caráter dias para maturação estão apresentadas na Tabela 8. Houve variação entre os genótipos avaliados. Observou-se uma variação de 18 dias entre as cultivares, sendo a cultivar BRS5804RR que apresentou menor ciclo, com 114 dias, e a cultivar M6410IPRO que apresentou maior ciclo, com 140 dias. Por meio da regressão linear, método adotado para se determinar a maturidade relativa, foi estimado o G.M para as cultivares avaliadas. Houve uma variação na estimativa dos G.M, com aqueles informados no RNC. Sendo a correlação de Pearson de 0,50. Essa correlação é considerada moderada (FILHO; JÚNIOR, 2019).

Tabela 8 - Valores do grupo de maturidade relativa estabelecidos pela regressão, utilizando a metodologia de análise de imagens.

Genótipos	DPM	G.M RNC	DPM estimado	G.M MPRI	Δ^1
95R51	123,0	5.5	125,0	6.0	0.5
BRS5601RR	123,0	5.6	122,7	5.8	0.2
M5705IPRO	133,0	5.7	127,9	6.3	0.6
BRS5804RR	123,5	5.8	114,8	4.9	0.1
DM5.8i	123,0	5.8	128,1	6.3	0.5
AS3590IPRO	128,5	5.9	128,4	6.4	0.5
M5947IPRO	132,0	5.9	128,2	6.3	0.4
BS2606IPRO	126,0	6.0	130,7	6.6	0.6
6160RSFIPRO	126,5	6.0	128,8	6.4	0.4
AS3610IPRO	132,0	6.1	130,7	6.6	0.5
BRS6203RR	128,0	6.2	130,8	6.6	0.4
M6210IPRO	136,0	6.2	130,8	6.6	0.4
BRS1003IPRO	130,5	6.3	128,3	6.4	0.1
M6410IPRO	133,0	6.4	140,6	7.7	1.3
Syn15640IPRO	133,0	6.4	137,0	7.3	0.9
INT7100IPRO	132,0	6.4	134,7	7.0	0.6
AS3680IPRO	129,5	6.8	127,6	6.3	-0.5
BMXPOTENCIARR	131,5	6.7	129,8	6.5	-0.2
TMG7067IPRO	130,0	6.7	132,2	6.8	0.1
96Y90	129,5	6.9	130,1	6.5	-0.4

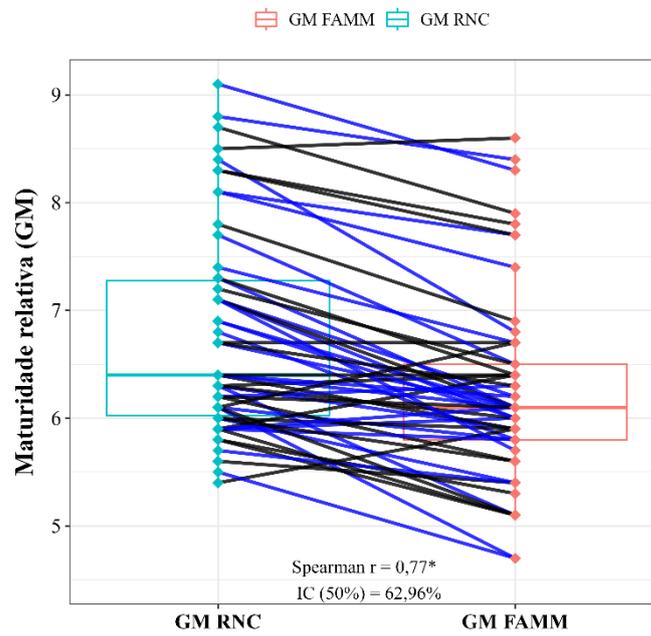
Correlação de Pearson 0.50

ER: $y = -7,2909 + (0,1064x)$ $R^2 = 0,95$. Grupo de maturação informado no registro nacional de cultivares (G.M RNC) e grupo de maturação estimado pelo método MPRI (G.M MPRI). Desvio entre o G.M RNC e G.M MPRI (Δ^1).

Fonte: Do autor, 2023.

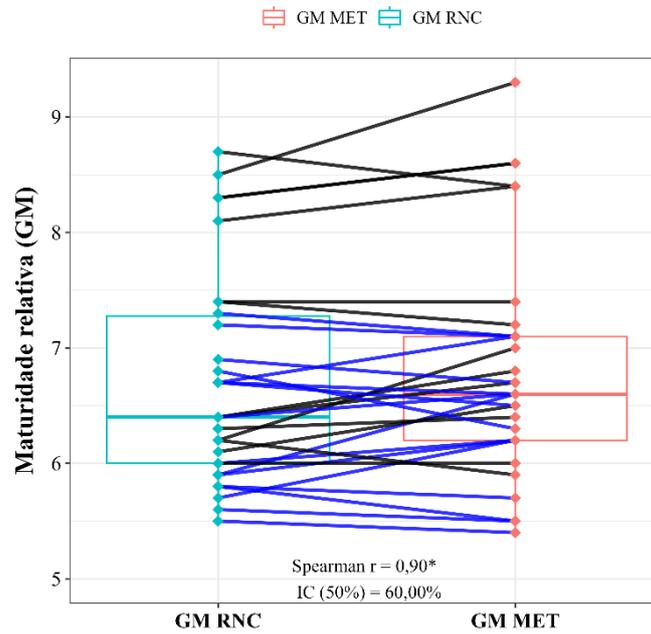
Verificou-se a coincidência, através do índice de Hamblin e Zimmermann (1986), de 50% das cultivares mais precoces e de 50% das cultivares mais tardias, em relação ao seu comportamento de maturação. A maior coincidência foi observada para a metodologia FAMM em que os genótipos selecionados coincidiram em 62,96% (Figura 1), ou seja, 62,96% continuaram sendo os mais precoces e mais tardios, após a predição das médias de maturação absoluta e predição do grupo de maturação relativo. Para a metodologia utilizando análise conjunta multiambiente e índices de vegetação, a coincidência foi a mesma de 60% (Figura 2 e 3), porém para a análise multiambiente a correlação de Spearman foi de maior magnitude de 0,90, enquanto a correlação para índice de vegetação foi de 0,65, sendo a menor correlação, já para a estratégia FAMM a correlação foi de 0,77.

Figura 1 – Correlação de Spearman entre os valores de maturação relativa (G.M RNC) das cultivares e os valores obtidos pela estratégia de fator analítico multiplicativo misto (GM FAMM).



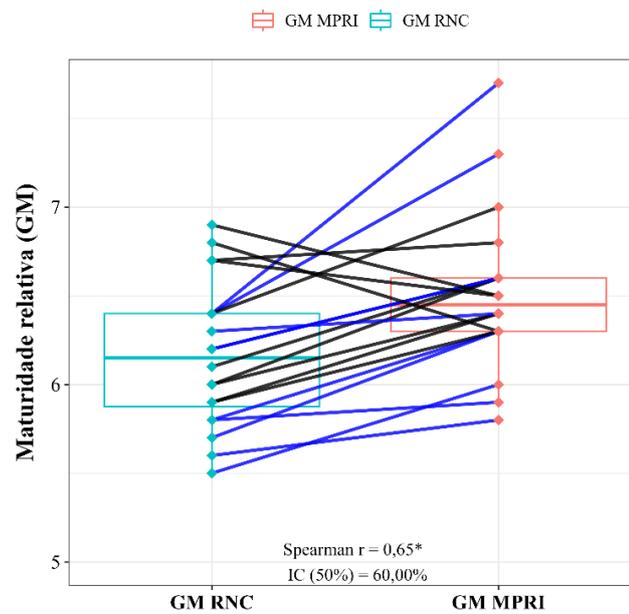
Fonte: Do autor, 2023.

Figura 2 – Correlação de Spearman entre os valores de maturação relativa (GM RNC) das cultivares e os valores obtidos pela estratégia de análise multiambiente (GM MET).



Fonte: Do autor, 2023.

Figura 3 - Correlação de Spearman entre os valores de maturação relativa (GM RNC) das cultivares e os valores obtidos pela estratégia de fenotipagem de alto rendimento obtidos pelo índice MPRI (GM MPRI).



Fonte: Do autor, 2023.

5 DISCUSSÃO

A precisão experimental é fundamental para que avaliações e inferências sejam realizadas com precisão e, por consequência resultados mais confiáveis. Neste estudo, adotou-se três estratégias de análise/estimação da maturidade relativa, assim como, duas estratégias para se avaliar a precisão experimental, o coeficiente de variação experimental (PIMENTEL-GOMES, 2009) e a acurácia (RESENDE; DUARTE, 2007). Foi notório as diferenças nas magnitudes do CVE e da acurácia (TABELA 3, 5 e 7).

No método em que se empregou as imagens para estimação da maturidade relativa observou-se menor precisão. Nesta estratégia utilizou-se apenas um local de avaliação em um ano agrícola, evidenciando a menor precisão (PIMENTEL-GOMES, 2009). Assim as estimativas do MPRI podem estar viesadas devido ao efeito ambiental, que pode ser a combinação de fatores previsíveis como também imprevisíveis (ALLARD; BRADSHAW, 1964).

Outro ponto que merece destaque está associado as épocas nas quais os voos foram realizados, neste estudo a partir de R7. Um fato que pode ter ocorrido está associado a não sincronia da maturação, isto é, desfolha total, hastes e vagens maduras com a época de realização do voo. Assim o índice de vegetação obtido pode não refletir a real maturação absoluta (TABELA 8). Uma alternativa para se mitigar este efeito seria a realização de voos diários, permitindo assim a captura de imagens mais assertivas e por consonância uma predição da maturação mais acurada (VOLPATO *et al.*, 2020).

Dentre as estratégias utilizadas, a melhor precisão foi observada no método FAMM (TABELA 5). Nesta análise foram considerados dados obtidos de seis anos agrícolas, deste modo, os efeitos da interação G x A podem ser estimados com acurácia. Portanto os G.M, tendem a refletir com propriedade o esperado, isto é, menor desvio de predição (TABELA 6).

Deve ser enfatizado, contudo, que o modelo com dois fatores explicou mais de 80% da variação genotípica observada, fato este fundamental para se inferir e predizer o grupo de maturação relativo (TABELA 6). Ficou evidente que existe alteração no G.M das cultivares, quando se compara o descrito no registro nacional de cultivares (RNC), e os estimados pela análise de regressão (ALLIPRANDINI *et al.*, 2009). Uma possível explicação para este fato pode estar alicerçada nos fatores ambientais que influenciam diretamente a fenologia da cultura da soja. Carvalho *et al.* (2020) enfatizaram que a maturação absoluta é muito influenciada pelos fatores ambientais. Outros autores também corroboram os comentários anteriores, evidenciando que os fatores ambientais previsíveis e imprevisíveis influenciam diretamente na maturidade relativa (CAVASSIM *et al.*, 2014).

Considerando os fatores preponderantes que influenciam na maturação da cultura da soja, pode-se destacar: fotoperíodo e temperatura (OHIGASHI *et al.*, 2019), época de semeadura (BEIXEIRA *et al.*, 2018), déficit hídrico (ZANNON *et al.*, 2015) e altitude (BARBOSA *et al.*, 2017). Em regiões tropicais e subtropicais uma alternativa para se atenuar os fatores ambientais na cultura da soja se perfaz pelo emprego da macroregiões sojícolas (MRS) bem como das regiões edafoclimáticas (REC) (KASTER; FARIAS, 2012). Muito embora, esta alternativa tem sido apregoada para o cultivo de soja no Brasil, não é impossível de mitigar todos os efeitos previsíveis e imprevisíveis na maturação. Fato este, que estimula os melhoristas de soja a buscar alternativas mais eficientes para se estimar a maturação relativa na cultura (CAVASSIM *et al.*, 2014; CARVALHO *et al.*, 2020).

O objetivo principal do presente estudo concerne no emprego de alternativas de estimação da maturidade relativa em soja. Foram empregadas três alternativas distintas. Na primeira estratégia adotou-se análise multiambientes, isto é, experimentos conduzidos no mesmo ano agrícola, porém em locais distintos. Neste contexto, é possível de isolar o efeito da interação genótipo x local. Na literatura existem relatos que evidenciam a importância da interação por locais em detrimento da interação por anos agrícolas (GESTEIRA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2015; SOARES *et al.*, 2015) para diferentes caracteres na cultura da soja. Na maioria dos relatos tem-se uma maior contribuição para a interação do fator ano vs. local. Porém, deve-se destacar que a quase totalidade dos estudos analisaram o fenótipo produtividade de grãos (SOARES *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2015; ZAMBIAZZI *et al.*, 2017; AMARAL *et al.*, 2019).

A maturação absoluta é um caráter com grande influência de fatores ambientais previsíveis, isto é, quando se utiliza mais de um local as estimações serão mais curadas. Neste estudo, nesta alternativa de análise, multiambiente, a correlação entre o grupo de maturação estimado e o descrito no RNC foi de alta magnitude (Tabela 4 e Gráfico 1). Este mesmo resultado foi observado por Cavassim *et al.*; 2014 e corroboram os achados reportados neste estudo.

Na segunda estratégia foi adotado o modelo de análise fatorial multiplicativo misto (FAMM), esta análise é particularmente importante quando se dispõe de grande número de ambientes, dados desbalanceados associados a efeitos aleatórios. A acurácia para esta estratégia foi alta, indicando a precisão experimental. Deve-se comentar, que não há relatos na literatura com o emprego do método FAMM para se estimar a maturidade relativa. Cavassim *et al.* (2014) utilizaram, o método de efeitos principais aditivos e interação multiplicativa (AMMI). Deve-se enfatizar que a filosofia analítica destes modelos é semelhante, porém a grande diferença se

perfaz na adoção de efeitos aleatórios (FAMM) em detrimento do efeito fixo (AMMI) (RESENDE; THOMPSON, 2004).

As estimativas do G.M pelo método FAMM em quase sua totalidade foram de menores magnitude do que o G.M informado pelo obtentor no RNC. Este fato pode ser explicado pela eliminação do ruído associado à predição (TABELA 6). No método FAMM outra observação que vale ressaltar é o efeito *shrinkage* (JAMES; STEIN, 1961). O encolhimento ocorre, pois, as médias preditas apresentam maior correlação com o real valor do G.M. Este efeito tem sido reportado na literatura para outros caracteres na cultura da soja (PEREIRA *et al.*, 2017).

O emprego de imagens e sensoriamento remoto figura-se como estratégia útil para os melhoristas visando obter a maturação absoluta. Santos *et al.* (2022) utilizaram o sensoriamento remoto para estimar a maturação na cultura do amendoim. Neste estudo obteve-se um acurácia de predição de 0,91 para o modelo de melhor ajuste. É oportuno destacar que em estudos os quais se emprega sensoriamento remoto, as parcelas devem apresentar no mínimo 100 m², isto é, efetivamente superiores a parcela empregada em nosso estudo de (10 m² de área útil total de 4 m² de área útil). Outro comentário adicional se perfaz no número de genótipos avaliados, Santos *et al.* (2022) adotaram apenas uma cultivar, por seu turno, em nosso estudo objetivou-se estimar a maturação de distintas cultivares de soja (TABELA 8).

Um dos grandes desafios no emprego de imagens está relacionado a luz natural, esta sofre alterações ao longo do dia, assim como as condições atmosféricas também afetam a qualidade da luz refletida e detectada pelos sensores. Uma maneira de se contornar essa situação é usar a calibração espectral, que nada mais é que o uso de um painel colorido de reflectância conhecida. usado para corrigir a luz refletida detectada pelos sensores, evitando assim o efeito da alteração da luz natural, bem como as condições atmosféricas (NARAYANAN *et al.*, 2019).

No presente estudo a calibração espectral não foi realizada, o que pode ter influenciado a predição das médias de dias para maturação e posteriormente a estimação do grupo de maturidade relativa, uma vez que estes se correlacionam de maneira direta. Existem outros fatores que podem gerar erros na obtenção de imagens tais como: parcelas heterogêneas, mistura de sementes de genótipos com diferentes grupos de maturação, acamamento, plantas daninhas e baixa germinação de sementes (VOLPATO *et al.*, 2020).

Em nosso trabalho para o processamento das imagens e estimação do índice de vegetação adotou-se como critério de correção o efeito “tampão”, isto é, faz-se a eliminação do solo para mitigar o efeito das possíveis plantas daninhas na maturação da parcela. Contudo, deve ser enfatizado que, caso ocorra plantas daninhas na área útil de amostragem o índice pode estar viesado. Este fato pode ter ocorrido no presente trabalho, pois, para algumas cultivares

(FIGURA 1A), após o MPRI atingir o ponto de mínimo, houve incremento na magnitude do índice, fato este não esperado.

Outro desafio está na sincronização de maturação da planta. Genótipos de soja que apresentam sincronia entre a senescência foliar total, apresentando hastes e vagens com coloração madura, pode se empregar a fenotipagem de alto rendimento com maior precisão. Porém outros genótipos, seja por fatores genéticos ou ambientais, apresentam hastes verdes, mesmo quando as vagens apresentam maduras. Nesse caso o uso de fenotipagem de alto rendimento para a determinação da maturação pode ser um desafio (NARAYANAN *et al.*, 2019).

O caráter *stay green* em soja é controlado geneticamente (LOPEZ; GUIAMET, 2000). Contudo, a haste verde é muito influenciada pelos fatores ambientais, tais como ocorrência de percevejos, disponibilidade hídrica dentre outros. O experimento, em que se obteve as imagens, foi conduzido na safra 2021/2022. Deve-se destacar que nesta safra, a precipitação média decorrente o período da safra foi 33% (superior) ao esperado para a região (INMET,2022). Associado a elevada precipitação teve-se a ocorrência de dias mais nublados. Estes fatores, associados, podem postergar a senescência da haste (caule verde), propiciando assim erro associado na estimação do índice de vegetação MPRI. Os comentários anteriores reforçam os achados obtidos no presente estudo e alicerçam correlação mediana obtida entre a maturação predita vs. a informada pelo obtentor no RNC (TABELA 8).

6 CONCLUSÃO

O método FAMM figura-se como uma estratégia eficiente na predição da maturação absoluta e relativa em soja, em condições tropicais.

O emprego da análise de imagem por meio de VANTs apresenta menor correlação entre o G.M predito e o informado no RNC, contudo, é uma estratégia promissora, sendo o principal desafio a melhoria na precisão na obtenção das imagens.

REFERÊNCIAS

- ALLARD, R. W.; BRADSHAW, A. D. **Implications of genotype-environmental interactions in applied plant breeding.** Crop Science. Madison. v. 4. n. 5. p. 503-508. 1964.
- ALLIPRANDINI, L.F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, P.F.; CAVASSIM, J.E.; GABE, H.L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M.N.; OLIVEIRA, M.A.R.; PITOL, C.; PRADO, L.C.; STECKLING, C. **Understanding Soybean Maturity Groups in Brazil: Environment, Cultivar Classification, and Stability.** Crop Science. v.49. n.3. p.801-807. jun. 2009.
- Almeida, L.A.; Kaster, M. & Kill, R.A.S. 1991. **Caracterização das cultivares de soja recomendadas no Brasil para o ano agrícola de 1991/02.1999** Londrina – Embrapa Soja. 5 pp.
- Andrea, M.C.d., Dallacort, R., Tieppo, R.C. et al., **Assessment of climate change impact on double-cropping systems.** SN Appl. Sci. 2. 544 (2020).
- Araus, J. L., Kefauver, S. C., Zaman-Allah, M., Olsen, M. S., & Cairns, J. E. (2018). **Translating high-throughput phenotyping into genetic gain.** Trends in plant science. 23(5). 451-466.
- Araus, J. L., & Cairns, J. E. (2014). **Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier.** Trends in plant science. 19(1). 52-61.
- B. Narayanan, B. Floyd, K. Tu, L. Ries, e N. Hausmann **"Improving Soja Procriação Utilizando Medidas de UAS de Maturidade Fisiológica"**. Proc. SPIE 11008. Sistemas Autônomos de Sensores de Ar e Solo para Otimização Agrícola e Fenotipagem IV. 110080U (14 de maio de 2019).
- Bai, G., Ge, Y., Hussain, W., Baenziger, P. S., & Graef, G. (2016). **A multi-sensor system for high throughput field phenotyping in soybean and wheat breeding.** Computers and Electronics in Agriculture. 128. 181-192.
- BARROS, H.B.; SEDIYAMA, T. Luz, umidade e temperatura. In: SEDIYAMA, T. (Ed.). **Tecnologias de produção e usos da soja.** Londrina. PR: Mecenas. 2009. p. 17-21.
- BORÉM, A. Melhoramento da Soja. In: Sedyama, T.; Teixeira, R. C.; Reis, M. S. Borém, A. (eds.). **Melhoramento de Espécies Cultivadas.** ed. Viçosa: UFV. p.487533. 1999.
- CÂMARA, G.M.S. **Fenologia da soja.** Informação Agronômicas. v. 82. p. 1-16. 2000.
- CARVALHO, JOÃO PAULO et al., **Classifying Soybean Cultivars Using an Univariate and Multivariate Approach.** Journal of Agricultural Science. v. 12. p. 190. 2020.
- CAVASSIM, J. E. **Classificação em grupos de maturidade relativa para a soja comparando metodologias de estabilidade.** 111 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2014.
- Cavassim, J. E., Bessalho Filho, J. C., Alliprandini, L. F., De Oliveira, R. A., Daros, E., & Guerra, E. P. (2013). **AMMI analysis to determine relative maturity groups for the classification of soybean genotypes.** Journal of Agronomy. 12(4). 168-178.
- Chawade, A., van Ham, J., Blomquist, H., Bagge, O., Alexandersson, E., & Ortiz, R. (2019). **High-throughput field-phenotyping tools for plant breeding and precision agriculture.** Agronomy. 9(5). 258.

- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Tecnologias de Produção de Soja Região Central do Brasil. 2020. Disponível em: <
<http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/SojanoBrasil.htm> >. Acesso em: 15 de janeiro de 2022.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Circular técnica n°48. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja. Sistemas de produção. Setembro 2020.
- FARIAS. J.R.B.; NEUMAIER. N.; NEPOMUCENO. A.L. 2001. **Efeito da variação diária da umidade do solo sobre a fotossíntese e resistência estomática da soja**. In Sociedade Brasileira Agrometeorologia. 9. ed. Anais. Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. 9. Campina Grande. PB. pp 68-70.
- FARIAS. J.R.B.; NEUMAIER. N.; NEPOMUCENO. A.L. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja. 2007. 9p. (Circular Técnica 48)
- FEHR. W. R.; CAVINESS. C. E **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology. 11 p. 1977.
- FIORANI. F.; SCHURR. U. Future scenarios for plant phenotyping. Annual review of plant biology. v. 64. p. 267-291. 2013. ISSN 1543-5008.
- FRANCHINI. J.; BALBINOT JUNIOR. A.; JORGE. L. D. C.; DEBIASI. H.; DIAS. W.; GODOY. C.; OLIVEIRA JUNIOR. A. D.; CORREA. F.; DE OLIVEIRA. M. J. E. S.-D. **Uso de imagens aéreas obtidas com drones em sistemas de produção de soja**. 2018.
- FRITSCHÉ-NETO. R.; BORÉM. A. **Fenômica: como a fenotipagem de próxima geração está revolucionando o melhoramento de plantas**. Editora UFV. p., 2016. ISBN 8572695583.
- Fundação MT. **Boletim de Pesquisa 2017/2018**. p. 53-98.
- GARNER. W. W.; ALLARD. H. A. **Effect of the relative length of day and night and other factors of the environment on growth and reproduction in plants**. J Agric Res 18 p.553–606. 1920.
- GARNER. W. W.; ALLARD. H.A. **Photoperiodic response of soybeans in relation to temperature and other environmental factors**. Journal of Agriculture Research. Washington. v. 41. n. 10. p. 719-735. 1930.
- GITELSON. A. A.; KAUFMAN. Y. J.; STARK. R.; RUNDQUIST. D. **Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction**. Remote Sensing of Environment. v. 80. n. 1. p. 76–87. 2002.
- GESTEIRA. G. D. S.; BRUZI. A. T.; ZITO. R. K.; FRONZA. V.; ARANTES. N. E. Data from: **Selection of early soybean inbred lines using multiple indices**. Dryad Digital. Repository. 2018.
- GESTEIRA. G. D. S.; ZAMBIAZZI. E. V.; BRUZI. A. T.; SOARES. I. O.; REZENDE. P. M. D.; SILVA. K. B. **Seleção fenotípica de cultivares de soja precoce para a região Sul de Minas Gerais**. Revista Agrogeambiental. v. 7. n. 3. 2015.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades@. 2016. Disponível em: <
<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=313820> >. Acesso em: 15 de janeiro de 2022.
- International Plant Phenotyping Network. Plant Phenotyping. 2019. Disponível em: <
www.plantphenomics.com >. Acesso em: 15 de janeiro 2022.

Internenational Plant Brazilian Nutrition-IPNI. **Como a soja se desenvolve**

JORGE. L. A. D. C.; INAMASU. R. Y. **Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão**. Embrapa Instrumentação-Capítulo em livro científico (ALICE). 2014. ISSN 8570353529.

Jumrani. K., Bhatia. V.S. **Impact of combined stress of high temperature and water deficit on growth and seed yield of soybean**. *Physiol Mol Biol Plants* 24. 37–50 (2018).

Jumrani. K., & Bhatia. V. S. (2019). **Interactive effect of temperature and water stress on physiological and biochemical processes in soybean**. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 25(3). 667-681.

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. 2001.

LIN. T.-S., SONG. Y., JAIN. A. K., LAWRENCE. P., KHESHGI. H. S.: **Effects of environmental and management factors on worldwide maize and soybean yields over the 20th and 21st centuries**. *Biogeosciences Discuss*.

Lindsey. A. J., Craft. J. C., & Barker. D. J. (2020). **Modeling canopy senescence to calculate soybean maturity date using NDVI**. *Crop Science*. 60(1). 172-180.

Maes. W. H., & Steppe. K. (2019). **Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture**. *Trends in plant science*. 24(2). 152-164.

MAIMAITIJIANG. M.; SAGAN. V.; SIDIKE. P.; HARTLING. S.; ESPOSITO. F.; FRITSCHI. F. B. **Soybean yield prediction from UAV using multimodal data fusion and deep learning**. [s.l: s.n.] v. 237

MEYER. G. E.; NETO. J. C. **Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications**. *Computers and Electronics in Agriculture*. v. 63. n. 2. p. 282–293. 2008.

Miranda. C., Scaboo. A., Cober. E., Denwar. N., & Bilyeu. K. (2020). **The effects and interaction of soybean maturity gene alleles controlling flowering time, maturity, and adaptation in tropical environments**. *BMC Plant Biology*. 20(1). 1-13.

Moeinizade. S., Pham. H., Han. Y., Dobbels. A., & Hu. G. (2022). **Uma abordagem de aprendizado profundo aplicada para estimar a maturidade relativa da soja a partir de imagens de UAV para ajudar nas decisões de melhoramento de plantas**. *Aprendizado de máquina com aplicativos*. 7. 100233.

Mundsttok. C.M.; Thomas. A.L. **Soja: fatores que afetam o rendimento de grãos**. 30 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2005.

Müller. M., Rako-Cevic. M., Caverzan. A. and Chavarria. G. (2017) **Grain Yield Differences of Soybean Cultivars Due to Solar Radiation Interception**. *American Journal of Plant Sciences*. 8. 2795-2810.

NEUMAIER. N.; NEPOMUCENO. A. L.; FARIAS. J. R. B.; OYA. T. Estresses de ordem ecofisiológica. In: BONATO. E. R. **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa. 2000. P. 45-64.

- NOGGUEIRA. A.P.O.; SEDIYAMA. T.; OLIVEIRA. R.C.T.; DESTRO. **Estádios de desenvolvimento. Tecnologias de produção de sementes de soja. Londrina. PR: Mecenas. 2013. P. 15-44.**
- NOGGUEIRA. 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.
- NOGGUEIRA. 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.
- Oliveira. A. B. D., Duarte. J. B., & Pinheiro. J. B. (2003). **Application of AMMI analysis in the assessment of yield stability in soybean.** Pesquisa Agropecuária Brasileira. 38(3). 357-364.
- PEREIRA. C.R. **Ánalyse do crescimento e desenvolvimento da cultura de soja sob diferentes condições ambientais.** 305 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2002.
- R CORE TEAM (2016). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for statistical Computinh. Vienna. Austria. URL: <http://www.R-project.org/>.
- Rafael Battisti. Paulo Cesar Sentelhas. **Characterizing Brazilian soybean-growing regions by water deficit patterns.** Field Crops Research. Volume 240. 2019.
- RAMALHO. M. A. P.; ABREU. A. D. F. B.; SANTOS. J. B. D.; NUNES. J. A. R. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas.** Lavras: UFLA. 2012. v. 1. p. 522.
- Resende. M. D. V., & Thompson. R. (2004). **Factor analytic multiplicative mixed models in the analysis of multiple experiments.** Revista de Matemática e Estatística. São Paulo., 22(2). 31-52.
- Reynolds. M., Chapman. S., Crespo-Herrera. L., Molero. G., Mondal. S., Pequeno. D. N., Sukumaran. S. (2020). **Breeder friendly phenotyping.** Plant Science. 295. 110396.
- Reynolds. Daniel. et al. **"What is cost-efficient phenotyping? Optimizing costs for different scenarios."** Plant Science 282 (2019): 14-22.
- RODRIGUES. O.; DIDONTE. A.D.; LHAMBY. J.C.B.; BERTAGNOLLI. P.F.; LUZ. J.S. **Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo.** Pesquisa Agropecuária Brasileira. v. 36. n. 3. p. 31-437. 2001.
- SAKAMOTO. T.; GITELSON. A. A.; NGUY-ROBERTSON. A. L.; ARKEBAUER. T. J.; WARDLOW. B. D.; SUYKER. A. E.; VERMA. S. B.; SHIBAYAMA. M. **Agricultural and Forest Meteorology An alternative method using digital cameras for continuous monitoring of crop status.** Agricultural and Forest Meteorology. v. 154–155. p. 113–126. 2012.
- Saryoko. A., Homma. K., Lubis. I., & Shiraiwa. T. (2017). **Plant development and yield components under a tropical environment in soybean cultivars with temperate and tropical origins.** Plant Production Science. 20(4). 375-383.
- SEDIYAMA. T.; SILVA. F.; BORÉM. A. **Exigências edafoclimáticas.** In: Silva. A. F.; Sedyama. T.; Borém. A. Soja: do plantio à colheita. Ed. Viçosa UFV. p. 54-65. 2015.

- SETIYONO. T. D., WEISS. A., SPECHT. J. E., BASTIDAS. A. M., CASSMAN. K. G., & DOBERMANN. A. **Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions.** *Field Crops Research.* 100. 257-271. 2007.
- Shoukun Dong. Yingze Jiang. Yuchen Dong. Libin Wang. Wenjia Wang. Zezhong Ma. Chao Yan. Chunmei Ma. Lijun Liu. **A study on soybean responses to drought stress and rehydration.** *Saudi Journal of Biological Sciences.* Volume 26. Issue 8. 2019.
- SILVA. K. B. et al. Adaptability and phenotypic stability of soybean cultivars for grain yield and oil content. *Genetics and Molecular Research.* v.15. n.2. 2015.
- Sloat. L.L., Davis. S.J., Gerber. J.S. et al. **Climate adaptation by crop migration.** *Nat Commun* 11. 1243 (2020).
- SOARES. I. O.; REZENDE. P. M. D.; BRUZI. A. T.; ZAMBIAZZI. E. V.; ZUFFO. A. M.; SILVA. K. B.; GWINNER. R. **Adaptability of soybean cultivars in different crop years.** *Genetics and Molecular Research.* v. 14. p. 8995-9003. 2015.
- SOARES. IGOR OLIVERI; BIANCHI. MARIANE CRISTINA; Bruzi. Adriano Teodoro; GESTEIRA. GABRIEL DE SIQUEIRA; SILVA. KARINA BARROSO; GUILHERME. SCHEILA ROBERTA; CIANZIO. SILVIA R. **Genetic and phenotypic parameters associated with soybean progenies in a recurrent selection program.** *Crop Breeding and Applied Biotechnology.* v. 20. p. 1/8. 2020.
- Souza. RR. Toebe. M., Marchioro. VS. Cargnelutti Filho. A., Mello. AC. Manfio. GL. ... & Junges. DL (2021). **Produtividade de grãos de soja em sistemas de cultivo de terras altas e baixas: Uma abordagem de interação genótipo por ambiente.** *Annals of Applied Biology* . 179 (3). 302-318.
- Shakoor. N., Lee. S., & Mockler. T. C. (2017). **High throughput phenotyping to accelerate crop breeding and monitoring of diseases in the field.** *Current opinion in plant biology.* 38. 184-192.
- Van Eeuwijk. F. A., Bustos-Korts. D., Millet. E. J., Boer. M. P., Kruijer. W., Thompson. A., ... & Chapman. S. C. (2019). **Modelling strategies for assessing and increasing the effectiveness of new phenotyping techniques in plant breeding.** *Plant science.* 282. 23-39.
- Volpato. L., Dobbels. A., Borem. A., & Lorenz. A. J. (2021). **Optimization of temporal UAS-based imagery analysis to estimate plant maturity date for soybean breeding.** *The Plant Phenome Journal.* 4(1). e20018.
- TAIZ. L. e ZIEGER. E. **Fisiologia vegetal.** Trad. SANTARÉM. E. R. et al., 5° ed., Porto Alegre: Artemed. 2013. 919 p.
- TUCKER. C. J. **Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment.**
- Xu. Y. (2016). **Envirotyping for deciphering environmental impacts on crop plants.** *Theoretical and Applied Genetics.* 129(4). 653-673.
- Yang. W., Feng. H., Zhang. X., Zhang. J., Doonan. J. H., Batchelor. W. D., & Yan. J. (2020). **Crop phenomics and high-throughput phenotyping: past decades. current challenges. and future perspectives.** *Molecular Plant.* 13(2). 187-214.

Yu. N., Li. L., Schmitz. N., Tian. LF., Greenberg. JA., Diers. BW., **“Desenvolvimento de métodos para melhorar a estimativa de rendimento de soja e prever a maturidade da planta com uma plataforma baseada em veículo aéreo não tripulado.”** Sensoriamento Remoto do Ambiente. 187 91 –101 (2016).

Yoshihira. T., Liang. S., Suzuki. H., Kitabatake. T., & Shiraiwa. T. (2020). **Effects of maturity group and stem growth habit on the branching plasticity of soybean cultivars grown at various planting densities.** Plant Production Science. 23(4). 385-396.

Zdziarski. A. D., Todeschini. M. H., Milioli. A. S., Woyann. L. G., Madureira. A., Stoco. M. G., & Benin. G. (2018). **Key soybean maturity groups to increase grain yield in Brazil.** Crop Science. 58(3). 1155-1165.

ZHANG. Q.Z.; MA. J.H.; CHEN. X.J.; FU. Y.F. Cloning and analysis of GmCOL4 gene in Glycine max L. Acta Agron Sin 36(4) p.539–548. 2010. (in Chinese with English abstract).

Zhou, J., Yungbluth, D., Vong. C. N., Scaboo. A, & Zhou. J. (2019). **Estimation of the maturity date of soybean breeding lines using UAV-based multispectral imagery.** Remote Sensing. 11(18). 2075.

ANEXO

Tabela 1A - Resumo da análise de variância individual para a característica dias para Maturação, para os experimentos conduzidos em Lavras e Ijaci. no ano agrícola 2021/2022.

Ambiente	QMe	CVe (%)	Acurácia (%)	Fc	Pr > Fc	GL
Ijaci	7.33	2.06	98.36	30.85	4.22e-09*	29
Lavras	8.13	2.12	97.28	18.69	3.50e-06*	29

* Significativo a 0.05 de probabilidade para o teste F de Fisher-Snedecor.

Fonte: Do autor, 2023.

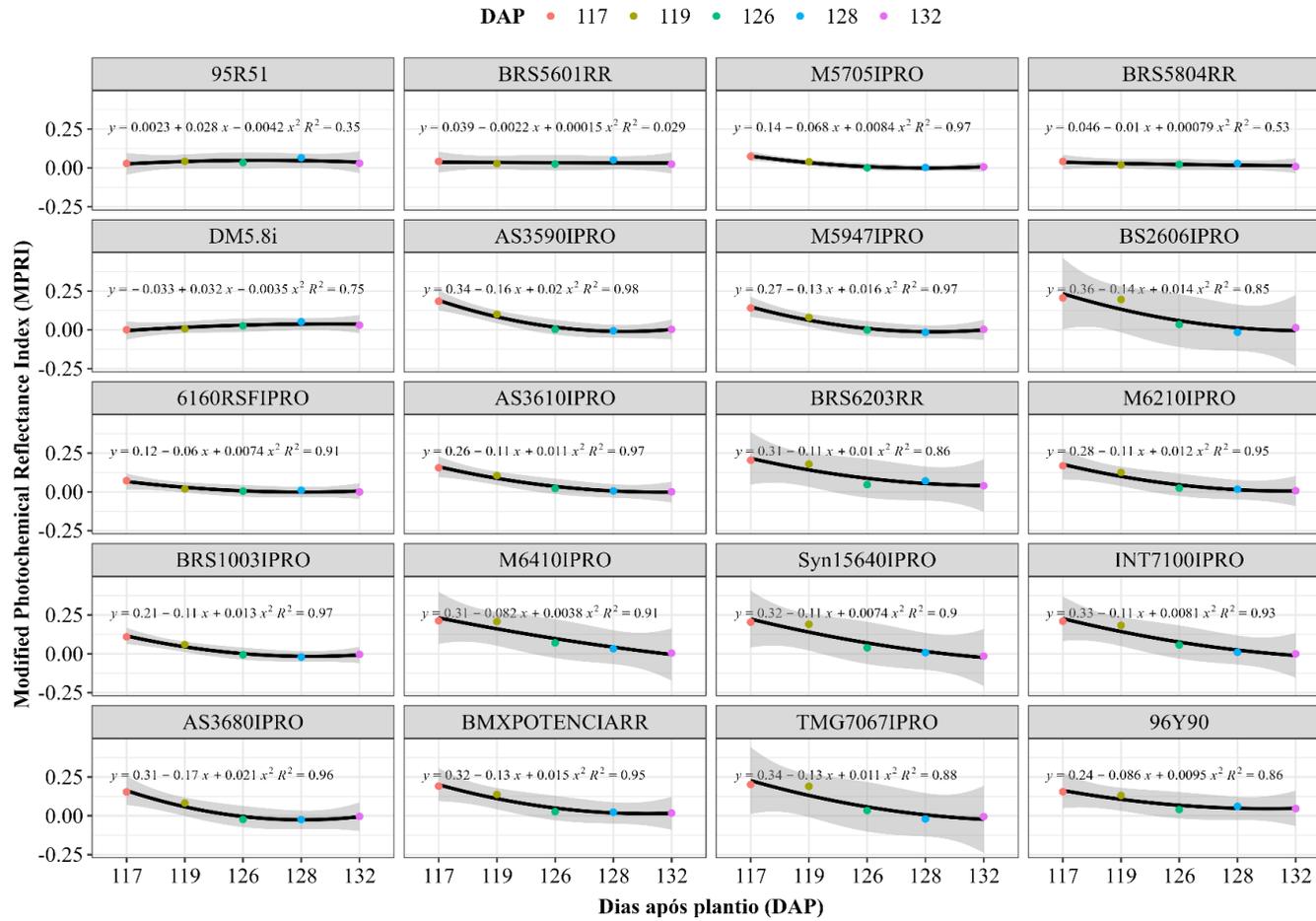
Tabela 2A - Resumo da análise de variância individual para a característica dias para maturação, para os experimentos conduzidos em Lavras e Ijaci. no ano agrícola 2021/2022.

AMBIENTE	QME	CVe (%)	Acurácia (%)	Fc	Pr > Fc	GL
E1	4.89	1.88	95.03	10.31	4.88e-07	22
E2	8.36	2.17	98.82	42.77	6.48e-14	24
E3	5.76	1.93	97.05	17.21	4.62e-12	30
E4	12.75	2.92	97.55	20.68	7.56e-22	60
E5	8.13	2.13	96.99	16.84	2.66e-11	29
E6	7.33	2.13	98.38	31.14	3.72e-15	29

* Significativo a 0.05 de probabilidade para o teste F de Fisher-Snedecor.

Fonte: Do autor, 2023.

Figura 1A - Valores do índice de vegetação MPRI obtido por voo valores pela estratégia de fenotipagem de alto rendimento.



Fonte: Do autor, 2023.