

SAMYRA ALVES CONDÉ

**MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA APLICADA À CLASSIFICAÇÃO DE UM
PAINEL DE LINHAGENS DE SOJA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Luiz Antônio dos Santos Dias

Coorientador: Felipe Lopes da Silva

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C745m
2024

Condé, Samyra Alves, 1990-
Modelagem agrometeorológica aplicada à classificação de um painel de linhagens de soja / Samyra Alves Condé. – Viçosa, MG, 2024.

1 tese eletrônica (46 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Luiz Antônio dos Santos Dias.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Agronomia, 2024.

Referências bibliográficas: f. 42-46.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.423>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Soja - Melhoramento genético. 2. AquaCrop (Software).
3. Diversidade genética. I. Dias, Luiz Antônio dos Santos, 1957-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia.
III. Título.

CDD 22. ed. 633.342


SAMYRA ALVES CONDÉ

**MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA APLICADA À CLASSIFICAÇÃO DE UM
PAINEL DE LINHAGENS DE SOJA**


Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 20 de março de 2024.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **SAMYRA ALVES CONDE**
Data: 04/08/2024 19:28:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Samyra Alves Condé
Autor

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ ANTONIO DOS SANTOS DIAS**
Data: 31/07/2024 12:18:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luiz Antônio dos Santos Dias
Orientador

*Aos meus pais, Sandra e João, e a minha
amada vó Irani.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ser meu guia e por me dar forças e graças para completar mais uma etapa de minha vida.

Sou grata aos meus pais, Sandra e João, pelo amor, apoio, educação e lição de vida, por sempre vibrarem com as conquistas e superações dos desafios da vida. Agradeço também a minha irmã Elisa pela admiração; a minha avó Irani por todos os conselhos e orações que me fizeram prosseguir; ao meu namorado Rodrigo por me ajudar incondicionalmente ao longo dessa jornada; a Leopoldina e Isabel pelo amor verdadeiro, leveza e por serem sempre luz nos momentos difíceis; e aos meus afilhados, tios, primos e amigos pelo constante carinho e orações.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Fitotecnia, pelo ensino de Excelência. Ao professor Luiz Antônio dos Santos Dias pela disponibilidade, orientação; ao professor Felipe Lopes da Silva, pela oportunidade na realização desse trabalho e ensinamentos; à professora Thais Roseli Corrêa, pela amizade, dedicação e incentivo. As secretárias da PPG-Fitotecnia, Tatiane e Lídia, por não medirem esforços para a conquista desse título.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

CONDÉ, Samyra Alves, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2024. **Modelagem agrometeorológica aplicada à classificação de um painel de linhagens de soja.** Orientador: Luiz Antônio dos Santos Dias. Coorientador: Felipe Lopes da Silva.

O processo de quantificação da produtividade potencial/atingível e seus respectivos fatores limitantes e magnitudes, é uma estratégia importante e necessária para auxiliar no processo de tomada de decisão no melhoramento de culturas, planejamento agrícola e compreensão das produtividades obtidas. Objetivou-se com este trabalho a calibração do modelo AquaCrop para linhagens de soja e elaboração de uma metodologia auxiliar no processo de seleção. A diversidade genética foi estimada a partir do método de agrupamento k-means, onde os 268 genótipos de soja foram estratificados em três grupos a partir da maturidade fisiológica. A partir deste agrupamento, oito subgrupos foram elaborados através da análise de componentes principais levando em consideração as variáveis altura de florescimento, maturação, dias para o florescimento e produtividade. Com base em dados obtidos em ensaios de campo com linhagens F_{3:5} e seis cultivares comerciais, aliados a informações relacionadas às características físico-hídricas do solo, manejo da cultura e clima, o modelo agrometeorológico AquaCrop foi calibrado. A estratégia de calibração se baseou na fixação das variáveis relacionados à duração do ciclo e variação das variáveis que atuam diretamente na produção de biomassa e produção de grãos. Tais variáveis foram estimadas por meio de uma abordagem volumétrica de produção de biomassa sugerida neste trabalho. A estimativa obteve bom desempenho e auxiliou na compreensão do comportamento dos grupos e calibração do modelo. A calibração por sua vez obteve resultado satisfatório em relação às métricas avaliadas, obteve-se um NRMSE que variou de 10,1 e 18,2%, e uma eficiência do modelo entre 0,43 e 0,57. Devido à particularidade do estudo, se faz necessário uma análise mais crítica e holística dos resultados obtidos e os respectivos métodos de avaliação.

Palavras-chave: Modelo agrometeorológico, diversidade genética, melhoramento de soja.

ABSTRACT

CONDÉ, Samyra Alves, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2024. Agrometeorological modeling applied to the classification of a panel of soybean lines. Adviser: Luiz Antônio dos Santos Dias. Co-advisers: Felipe Lopes da Silva.

The process of quantifying potential and attainable yield, and their respective limiting factors and magnitudes is an important and necessary strategy to assist in crop breeding decision-making, agricultural planning, and crop yield comprehension. This study aimed to calibrate the AquaCrop model for soybean lines and develop an auxiliary methodology in the selection process. The genetic diversity was estimated using the k-means clustering method, where the 268 genotypes were stratified into three groups based on physiological maturity. From this grouping, eight subgroups were created through principal component analysis, considering the variables flowering and maturation height, days to flowering, and crop yield. Based on data obtained in field trials with $F_{3:5}$ lines and six commercial cultivars, combined with information related to the physical water characteristics of the soil, crop management, and climate, the AquaCrop agrometeorological model was calibrated. The calibration strategy was based on fixing variables related to cycle duration and variation of variables that act directly on biomass production and grain production. Such variables were estimated using a volumetric biomass production approach suggested in this study. The estimation methodology performed well and helped to understand the behavior of the groups and calibrate the model. The calibration obtained a satisfactory result about the evaluated metrics, obtaining an NRMSE ranging from 10.1 – 18.2% and a model efficiency between 0.43 – 0.57. Due to the particularity of the study, a more critical and holistic analysis of the results obtained, and the respective evaluation methods is necessary.

Keywords: Agrometeorological model, genetic diversity, soybean breeding.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 8 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA..... | 9 |
| 2.1 Melhoramento e Diversidade Genética | 9 |
| 2.2 Modelos agrometeorológicos..... | 10 |
| 2.3 Modelo AquaCrop FAO..... | 11 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 13 |
| 3.1 Material Vegetal..... | 13 |
| 3.2 Condução do experimento de campo..... | 14 |
| 3.3 Características avaliadas..... | 15 |
| 3.4 Análise de diversidade genética e agrupamento..... | 16 |
| 3.5 Modelo agrometeorológico aplicado e dados de entrada..... | 17 |
| 3.6 Processo de calibração do modelo..... | 19 |
| 3.7 Estimativa dos valores de HI e WP..... | 22 |
| 3.8 Avaliação do desempenho do modelo agrometeorológico..... | 24 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 25 |
| 4.1 Variáveis meteorológicas..... | 25 |
| 4.2 Agrupamento e diversidade genética..... | 29 |
| 4.3 Caracterização dos subgrupos para calibração..... | 33 |
| 4.4 Calibração do modelo..... | 37 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 41 |
| REFERÊNCIAS..... | 42 |

1 INTRODUÇÃO

A soja cultivada (*Glycine Max* (L.) Merrill) é originária do leste da Ásia (Hymowitz, 1970). Atualmente, é a leguminosa mais cultivada no mundo, com uma produtividade total na safra 2022/2023 de 369.029 milhões de toneladas produzidos em uma área de 136.029 milhões de hectares (USDA, 2024). O seu destaque no cenário mundial se dá devido a gama de utilização de seus grãos, podendo citar: óleo vegetal e componentes proteicos, utilizados na alimentação animal e humana, e na fabricação de biocombustíveis (Thrane et al., 2017; Hirakuri; Lazzarotto, 2014).

Nos últimos anos o Brasil vem se consolidando como maior produtor e exportador mundial desta commodity, registrando na safra 2022/2023 uma produção de 154.566 milhões toneladas, associadas a uma produtividade média de 3.508 kg/ha em uma área de 44.062 milhões de hectares. O estado do Mato Grosso é o maior produtor, seguido por Paraná, Rio Grande de Sul e Goiás, que juntos somaram cerca de 65% da produção nacional. O estado de Minas Gerais, produziu 8.343 milhões de toneladas, com uma produtividade média acima da nacional, obtendo 3.900 kg/ha (CONAB, 2024).

Os principais fatores responsáveis para a disseminação e maior produtividade do cultivo da soja no Brasil são: desenvolvimento de tecnologias de produção e manejo, e a consolidação dos programas de melhoramento genético (Silva et al., 2017). Sendo o objetivo desse último o desenvolvimento de cultivares superiores aos já existentes no mercado, ou seja, apresentando alta produtividade, estabilidade e adaptabilidade (Borém et al., 2017). Para a obtenção dos cultivares superiores se faz necessário a compreensão da interação genótipo x ambiente e dos respectivos fatores limitantes. Nesse sentido, tecnologias e ferramentas que auxiliem os melhoristas a identificar melhores genótipos sob influência da interação genótipo x ambiente tendem a ser cada vez mais incorporadas à rotina dos programas de melhoramentos de plantas, visando uma seleção mais assertiva e uma melhor compreensão do desempenho e potencialidades dos materiais.

Quantificar a produtividade potencial e atingível, concomitantemente os respectivos fatores limitantes das cultivares é uma importante e necessária ferramenta para auxiliar na tomada de decisão, seleção e alocação de materiais, além do desenvolvimento de políticas públicas e direcionamento de investimentos para a expansão agrícola eficiente e sustentável (Van Ittersum et al., 2013a).

No entanto, a obtenção de resposta da produtividade potencial/atingível de uma determinada cultura, associada a diferentes condições edafoclimáticas e/ou experimentos controlados é demorado, trabalhoso e de alto custo. Diante do exposto e considerando tais limitações, o presente estudo tem como objetivo a calibração do modelo AquaCrop para linhagens de soja submetidas a um programa de melhoramento, com o intuito de gerar uma ferramenta auxiliar no processo de tomada de decisão, seleção e alocação dos materiais. Além de permitir uma abordagem holística do desempenho e potencial das linhagens, relacionando as condições edafoclimáticas com a respectiva produtividade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Melhoramento e Diversidade Genética

O desenvolvimento de uma nova cultivar de soja é resultado de uma série de processos que, resumidamente, envolvem: i) seleção de genitores para a hibridação artificial com o intuito de recombinar genes de diferentes materiais; ii) obtenção da população segregante; iii) escolha do método de condução da população segregante mais adequado para obter resultados esperados; iv) testes de desempenho agrônômico; v) seleção e avaliação das linhagens experimentais com as características agrônômicas desejáveis; e vi) lançamento de uma nova cultivar, que é testada e indicada para regiões específicas (Borém; Miranda, 2017; Ceccarelli, 2015).

Um desafio encontrado nos programas de melhoramento de soja consiste na interação genótipo x ambiente. Essa interação quantifica a maneira como os genótipos reagem de maneira distinta às variações ambientais (Cruz et al., 2014). Dessa forma, é de suma importância o conhecimento sobre diversidade genética para obtenção de cultivares com características específicas para cada região, bem como a sua adaptação ao meio, visando elevar os rendimentos da cultura (Sediyama, 2015; Hirakuri, 2016).

O estudo de diversidade genética auxilia na tomada de decisão sobre as escolhas de genitores apropriados para adquirir híbridos que resultem em uma heterose superior e que possibilite um aumento da recombinação gênica (Cruz et al., 2014). Esses estudos podem ser realizados a partir da avaliação de características fenotípicas, moleculares ou por meio do coeficiente de parentesco. As análises para

predição da diversidade genética são realizadas com base em técnicas multivariadas, como a análise de agrupamento que, tem como principal objetivo formar grupos de genótipos distintos entre si (heterogêneos) e similares dentro de cada grupo (Cruz et al., 2020).

2.2 Modelos Agrometeorológicos

Os modelos agrometeorológicos se apresentam como uma importante ferramenta para quantificar a produtividade potencial e atingível, e os respectivos cenários com escassez hídrica e condições edafoclimáticas adversas na produção agrícola, além de permitir sua utilização juntamente com modelos hidro climáticos e econômicos para apoiar a formulação de políticas públicas, e permitir um suporte na decisão à nível de fazenda e ou região (Foster; Brozović, 2018; García-Vila; Fereres, 2012; Kim; Kaluarachchi, 2016).

Os modelos utilizados para simular uma cultura em campo são aproximações da realidade, servindo para orientar na tomada de decisões a campo. Sendo assim, o ideal é formular um modelo que seja suficientemente complexo para descrever o que acontece no campo (Amiri, 2016). Porém, a utilização de modelos de crescimento de culturas em condições diferentes daquelas do local onde foram desenvolvidos é limitada, necessitando de ajustes em razão das diferenças edafoclimáticas do local de estudo, e características genéticas da planta utilizada (He et al., 2017; Jones et al., 2017).

A calibração do modelo envolve a modificação de alguns parâmetros, de modo que os dados simulados sem erros se ajustem aos dados observados. Em muitos casos, mesmo se um modelo for baseado em dados observados, os valores simulados não correspondem exatamente aos dados observados e pequenos ajustes devem ser feitos para alguns parâmetros. A não conformidade pode surgir de erros de amostragem, bem como de conhecimento incompleto do sistema. Alternativamente, pode surgir quando o modelo é usado em uma situação marcadamente diferente daquela sob a qual foi desenvolvido.

De forma geral, os modelos matemáticos voltados à agricultura necessitam de cuidadosa calibração e criteriosa validação, para avaliar sua robustez em diferentes ambientes e condições (Confalonieri et al., 2016; He et al., 2017; Jones et al., 2017). Assim, para que os resultados do estudo sejam confiáveis, todos os

modelos devem ser calibrados e validados para as condições de interesse. A calibração de modelos envolve a estimativa e/ou ajuste de parâmetros chaves, de forma a minimizar o erro entre os dados reais e simulados. A calibração é necessária, pois nem todos os parâmetros do modelo podem ser medidos diretamente no campo.

2.3 Modelo AquaCrop FAO

Buscando simplificar o processo de simulação da produtividade a “*Food Agriculture Organization of the United Nations – FAO*”, desenvolveu o AquaCrop, um modelo de cultivo agrícola dinâmico que simula a produtividade potencial de cultivos herbáceos em função do consumo de água (Steduto et al., 2009). O AquaCrop difere dos outros modelos de cultivos agrícolas pela sua acurácia e equilíbrio, simplicidade e robustez. Além de ser um modelo que requer relativamente um pequeno número de parâmetros e poucos dados de entrada, sendo esses parâmetros considerados de simples obtenção e mais intuitivos. (Foster et al., 2017; Steduto et al., 2009).

O AquaCrop foi projetado para ser amplamente aplicável em diferentes condições de clima e solo, sem a necessidade de parametrização local, uma vez que foi devidamente parametrizado para uma determinada espécie de cultivo. Para tal, o modelo é construído com parâmetros divididos em dois grupos. Um grupo é considerado conservador, em que os parâmetros devem permanecer basicamente constantes em diferentes condições de cultivo e regimes de água (Parâmetros Conservativos). O outro grupo engloba parâmetros que dependem da localização, cultivo e práticas de manejo, e devem ser especificados pelo usuário (Parâmetros Não-conservativos) (Steduto et al., 2012). A maioria dos parâmetros não-conservativos requerem ajustes para considerar as características específicas da variedade estudada, do ambiente de cultivo e questões relacionadas à fenologia da cultura (Steduto et al. 2012; Li et al. 2019).

No geral, os parâmetros de entrada que o usuário necessita fornecer são os parâmetros não-conservativos e são intuitivos e de fácil obtenção. O modelo AquaCrop apresenta quatro módulos: solo, cultura, clima e manejo. O modelo requer dados climáticos básicos, datas de plantio e maturidade, detalhes do crescimento da cultura e duração dos estádios fenológicos, dados de tratamentos culturais e manejo de água no solo e propriedades do solo. Tais parâmetros de entrada são considerados poucos e relativamente de fácil obtenção quando comparado com os demais modelos.

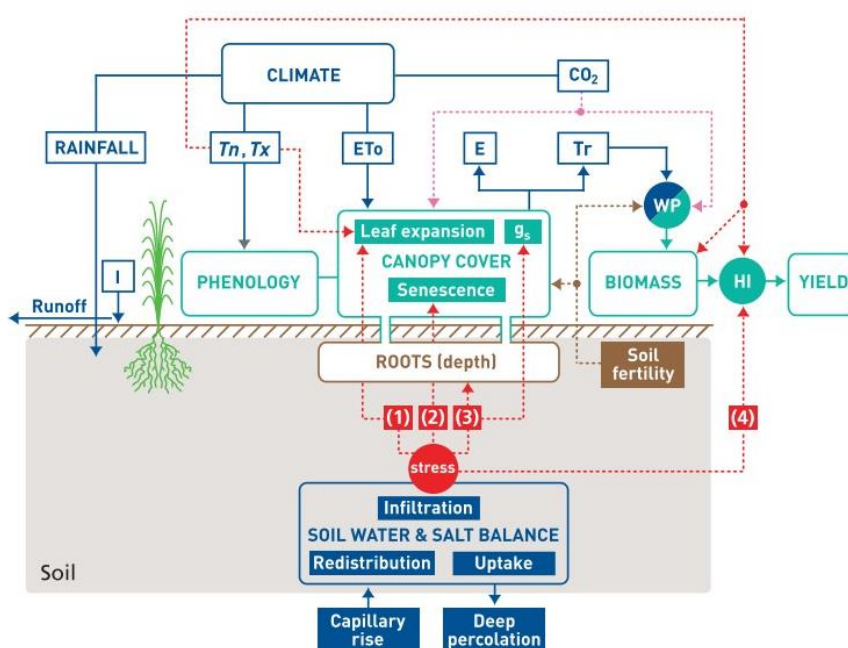
Considerando os parâmetros de saída, o AquaCrop calcula a biomassa acima do solo com base na produtividade de água normalizada e na proporção de transpiração e evapotranspiração de referência. O rendimento é assumido como uma função do índice de colheita de referência e da biomassa acima do solo.

A biomassa é o parâmetro de saída que multiplicado pelo HI – “*Harvest Index*” nos fornecerá a produtividade. No entanto, a biomassa também é a principal variável de estado no processo de modelagem do AquaCrop. Tal variável irá descrever as condições do sistema e poderá mudar com o tempo à medida que os componentes do sistema se interagem com o meio (Kersebaum et al., 2015). O AquaCrop é um modelo dinâmico, o que significa que a variável de estado varia ao longo do tempo e das interações (D. Raes et al., 2018; Steduto et al., 2012).

A produtividade responde ao estresse hídrico, que pode ocorrer a qualquer momento, por meio de quatro ligações de controle principais via coeficientes de estresse (Ks): redução da taxa de expansão do dossel (normalmente durante o crescimento inicial), fechamento dos estômatos (por toda parte o ciclo de vida), aceleração da senescência do dossel (tipicamente durante o crescimento tardio) e mudanças em HI (após o início do crescimento reprodutivo). A cobertura e a duração do dossel verde representam a fonte de transpiração, e a quantidade de água transpirada se traduz em uma quantidade proporcional de biomassa produzida por meio de WP: A porção de interesse econômico da biomassa, o rendimento, é então determinada como Biomassa \times Harvest Index.

Em resumo, o AquaCrop leva em consideração quatro componentes principais e respostas dinâmicas associadas (Figura 1): fenologia, dossel da folhagem, profundidade de enraizamento, produção de biomassa e produtividade. A cultura cresce e se desenvolve ao longo de seu ciclo, expandindo sua copa e aprofundando seu sistema de enraizamento enquanto avança por seus estádios fenológicos.

Figura 1- Gráfico do AquaCrop mostrando os principais componentes do contínuo solo-planta-atmosfera e os parâmetros que conduzem a fenologia, cobertura do dossel, transpiração, produção de biomassa e rendimento final. Linhas contínuas indicam ligações diretas entre variáveis e processos. As linhas pontilhadas indicam *feedbacks*. Os símbolos são: I, irrigação; Tn, temperatura mínima do ar; Tx, temperatura máxima do ar; ETo, evapotranspiração de referência; E, evaporação do solo; Tr, transpiração do dossel; gs, condutância estomática; WP, produtividade da água; HI, índice de colheita; CO₂, concentração atmosférica de dióxido de carbono; (1), (2), (3), (4), funções de resposta ao estresse hídrico para expansão foliar, senescência, condutância estomática e índice de colheita, respectivamente.



Fonte: Modificado de Steduto et al. (2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material vegetal

As linhagens de soja que foram utilizadas neste estudo são oriundas do Programa de Melhoramento de Soja da Universidade Federal de Viçosa (UFV), pertencente ao Departamento de Agronomia (DAA). O bloco de cruzamentos do qual as linhagens foram derivadas foi planejado em esquema de dialelo completo, com 6 genótipos comerciais (BRASMAX Apolo RR, M5838 IPRO, GMS 6833 RR, NA 5909 RR, TMG 7262RR, TMG 7363 RR).

A partir desses cruzamentos foram formadas 15 populações F_1 . As sementes colhidas nas plantas F_1 das 15 populações compuseram as populações F_2 que juntamente com os 6 genitores foram semeadas na área experimental da Horta Nova, pertencente à Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG. Nas populações F_3 foram realizadas a seleção dentro das famílias nos municípios de Capinópolis, Madre de Deus e Viçosa-MG. A partir desse material, foi iniciada a pesquisa com famílias $F_{3:5}$, o qual o presente trabalho se refere.

3.2 Condução do experimento de campo

O presente trabalho foi implantado e conduzido em campo na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão - Horta Nova (Figura 2) ($20^{\circ}45'14''$ S e $42^{\circ}52'55''$ W, a altitude 648m), pertencente ao DAA-UFV, Viçosa- MG, de novembro de 2022 a março de 2023.

Figura 2- Vista aérea da Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão-Horta Nova. Achurado de amarelo consiste a área utilizada para a condução do experimento dos 268 genótipos.



Fonte: Google Earth.

O clima da região, de acordo com a classificação de Koppen (1948), é do tipo Cwa caracterizado pela estação “fria-seca” entre abril e agosto e “quente-chuvosa” entre setembro e março apresentando média anual de 1.221 mm de precipitação

pluvial, e 26,4 °C e 14,8 °C de temperaturas médias máxima e mínima, respectivamente. O solo da área experimental é caracterizado como Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico, textura Franco Argilo-Arenosa, conforme Embrapa (2013). Os resultados da análise física de amostras retiradas na camada de 0-20 cm de profundidade estão na Tabela 1.

Tabela 1- Características físicas do solo na camada de 0-20 cm de profundidade.

| Características físicas | Valor |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Areia grossa (kg kg ⁻¹) | 0,342 |
| Areia fina (kg kg ⁻¹) | 0,133 |
| Silte (kg kg ⁻¹) | 0,140 |
| Argila (kg kg ⁻¹) | 0,384 |
| Classificação textual (1) | Franco Argilo-Arenoso |

Fonte: Autora (2024).

Antes da instalação do experimento foi realizado o plantio de aveia preta durante a safra de inverno, que serviu de matéria orgânica e palhada para o experimento na safra de verão. Posteriormente, o solo foi preparado e a adubação feita de acordo com análise química do solo.

O plantio foi realizado no dia 23 de novembro de 2022 e contou com 262 linhagens F_{3:5} de soja conduzido sob o Delineamento de Blocos Aumentados (DBA) de Federer (Federer, 1955), com 6 repetições para as 6 cultivares comerciais utilizadas como testemunhas (BRASMAX Apolo RR, M5838 IPRO, GMS 6833 RR, NA 5909 RR, TMG 7262RR, TMG 7363 RR), totalizando assim 268 genótipos a serem avaliados. As unidades experimentais foram constituídas por três linhas de 1,5 m de comprimento, espaçadas em 0,50 m, em sistema de plantio direto com densidade de 16 plantas por metro. Os tratos culturais e as operações de manejo foram realizados de acordo com as recomendações para a cultura propostas por Silva et al. (2022).

3.3 Características avaliadas

As características agronômicas foram avaliadas conforme descrições a seguir:

a) *Dia da emergência (DE)*:

Número de dias compreendido entre o plantio e a emergência das plântulas (quando 50% das plântulas emergirem).

b) Dias para o florescimento (DF):

Número de dias compreendido entre a emergência das plântulas e o florescimento (quando 50% das plantas da parcela atingirem o estágio R2).

c) Altura da planta no florescimento (AltF):

Altura de três plantas representativas em R2 em cada parcela. Dada pela distância do colo da planta até a extremidade da haste principal, em cm. As análises foram realizadas através da obtenção das médias das observações da parcela.

d) Dias para maturação (DM):

Número de dias compreendido entre a emergência das plântulas e a maturação (quando 50% das plantas da parcela atingirem o estágio R8).

e) Altura da planta na maturação (AltM):

Altura de três plantas representativas em R8 em cada parcela. Dada pela distância do colo da planta até a extremidade da haste principal, em cm. As análises foram realizadas através da obtenção das médias das observações da parcela.

f) Produção total de grãos por parcela (PROD):

Produção total de grãos por parcelas, em gramas, pesado com o auxílio de balança digital de precisão.

3.4 Análise de diversidade genética e agrupamento

As análises de diversidade para formação dos grupos genotípicos em relação a variável DM foram realizadas através do método de agrupamento *k-means*, com matriz de similaridade calculada através da distância euclidiana. Para a determinação do número ideal de “clusters”, foram realizadas sucessivas iterações de *k-means* e foi adotado o parâmetro de menor quantidade de cluster com o máximo de variação explicado. Durante esse processo foram calculados os valores do Critério de Informação de Akaike (AIC) e os coeficientes de variação entre os agrupamentos. O número ideal de clusters foi definido a partir do ponto onde a curva de coeficiente de variação e o respectivo AIC apresentaram um ponto de inflexão.

Após o processo de formação dos grupos, foi realizado a classificação dos genótipos em subgrupos para todas as variáveis em estudo seguindo os procedimentos da análise de componentes principais (PCA). Essa metodologia

permite identificar e descrever agrupamentos e contabilizar a contribuição de cada variável para o componente principal. Ao final, foi realizado uma análise de variância (ANOVA) e o teste Tukey para comparar a diferença entre as médias entre cada subgrupo formado. Todas as análises foram realizadas no software R v. 4.3.1. (R Development Core and Team, 2023).

A partir da análise de PCA e agrupamento, novos grupos foram gerados dentro de cada grupo previamente estratificado. Para a definição da quantidade de subgrupos foi utilizada o teste Tukey ($\alpha = 0,05$) e um processo de iteração na criação de subgrupos e aplicação do teste de médias para avaliar a significância. Apenas os grupos estatisticamente diferentes foram mantidos para a análise.

3.5 Modelo agrometeorológico aplicado e dados de entrada

O modelo agrometeorológico utilizado foi o AquaCrop, versão 6.1, disponibilizado pela FAO (2018), cujos dados de entrada para os processos de calibração e validação do modelo estão relacionados aos aspectos do clima, cultura, solo e manejo (Raes et al., 2009; Raes et al., 2018).

a) Clima: Os dados diários de temperatura máxima, mínima e média do ar ($^{\circ}\text{C}$), precipitação pluviométrica diária (mm dia^{-1}), radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{m}^{-1}$), umidade relativa do ar (%) e velocidade do vento (km h^{-1}), do período entre 13 de novembro de 2022 e 05 de abril de 2023, foram obtidos através da estação meteorológica do INMET, localizada no município de Viçosa-MG. A evapotranspiração de referência foi estimada com o método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), através da equação 1 abaixo:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T_{med} + 273} U (es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (1)$$

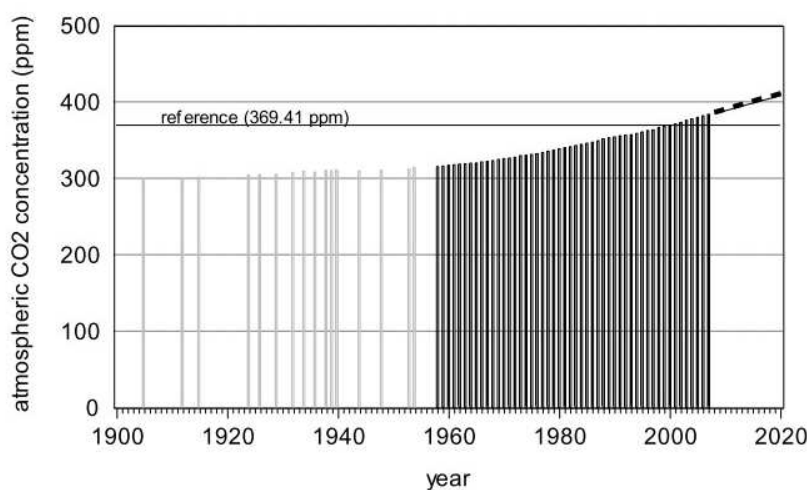
Em que:

ET_0 : Evapotranspiração de Referência (mm dia^{-1}); Rn : Saldo de radiação diário ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); G : Fluxo total diário de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); T : Temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$); U_2 : Velocidade do vento média diária à altura de 2 m (m s^{-1}); es : Pressão de saturação do vapor médio diário (kPa); ea : Pressão atual do vapor médio diário (kPa); $(es - ea)$: déficit de saturação de vapor médio diário (kPa); Δ : declividade

da curva da pressão do vapor em relação à temperatura ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); γ : coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Outra informação requerida pelo modelo é a concentração de CO_2 na atmosfera. Além de seu aumento contínuo ao longo dos anos, o CO_2 atmosférico varia com o ciclo anual e com a localização. Essas variações são pequenas e de significância mínima em termos de impacto nas safras. Para simplificar, o AquaCrop fornece como valores padrão a concentração média anual de CO_2 atmosférico de 1902 ao último ano medida no Observatório Mauna Loa no Havaí (Figura 3). Os usuários podem inserir seu próprio conjunto de dados ou o CO_2 previsto de acordo com cenários de mudança climática pré-determinado. O valor de referência é de 369,41 ppm, que é a concentração média de CO_2 atmosférico para o ano 2000 medida no Observatório Mauna Loa no Havaí (EUA). O observatório foi selecionado como local de referência porque o ar do local é muito puro devido à sua localização remota no Oceano Pacífico, grande altitude e grande distância das principais fontes de poluição. (Dirk Raes et al., 2018b; Steduto et al., 2012; Steduto et al., 2009). Para o presente estudo foi considerado a abordagem mencionada acima e um valor de concentração de CO_2 de 417,21 ppm.

Figura 3- Concentrações atmosféricas de CO_2 derivadas de amostras de gelo (barras claras), observadas no observatório de Mauna Loa (barras escuras), e previstas (linha pontilhada) assumindo um aumento contínuo de 2ppm / ano a partir do valor de referência.



Fonte: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>

b) *Cultura*: A data de semeadura foi igual para todas as parcelas (23/11/2022) e a colheita realizada manualmente à medida que as parcelas atingiam o ponto de colheita. A duração dos estádios fenológicos da cultura (em dias para emergência, florescimento, senescência e maturidade fisiológica) foi quantificada nas visitas periódicas realizadas no campo experimental. Com o espaçamento utilizado dentro e entre as parcelas, foi possível estimar uma população 333.333 plantas por hectare. Os seguintes parâmetros foram calibrados no modelo: coeficiente de declínio do dossel (CDC); índice de produtividade de água (WP*); índice de colheita de referência (Hlo); e, coeficiente máximo da cultura ($K_{cmáx}$). Algumas variáveis requeridas pelo modelo foram retiradas da literatura, como a máxima cobertura do dossel; máxima e mínima profundidade efetiva de raízes, temperaturas limites (mínima e máxima) para crescimento da planta, entre outros. A salinidade não foi considerada no presente estudo.

c) *Manejo*: O modelo permite inserir dados sobre a presença, o tipo de cobertura e a porcentagem que ela cobre o solo (%), as práticas culturais que evitam o escoamento superficial da água e a possibilidade de quatro níveis de fertilização (alto, próximo ao ideal, médio e baixo). Como a fertilização foi realizada próxima ao ideal, adotou-se o nível “alto”. A cobertura do solo foi considerada “100%” devido ao plantio da aveia preta na safra de inverno e a área já ser consolidada com o plantio direto. Os controles fitossanitários e de adubação foram realizados de acordo com o requerido pela cultura. A irrigação não foi considerada no presente trabalho.

d) *Solo*: O aplicativo possui solos já calibrados e foi utilizado a “Clay Loam” que corresponde a textura do solo encontrado no local (Tabela 1).

3.6 Processo de calibração do modelo

No total foram utilizados no processo de calibração 3 subgrupos, sendo cada um representado por um grupo diferente formado a partir da variável dia de maturação. Em relação aos dados de entrada de clima, cultura, manejo e solo eles foram os citados no item anterior. O que diferencia é que o ponto de partida foi os parâmetros já calibrados no Aquacrop para a cultura da soja.

Esses valores específicos para a cultura da soja (Tabela 2) foram encontrados no Manual de Referência do AquaCrop (FAO, 2018) e são calibrados e validados para uma determinada condição específica de clima e solo. Eles são divididos em

conservativos e não conservativos, onde o primeiro não necessita de calibração e o segundo necessitam de ajustes para melhores resultados.

Tabela 2- Parâmetros conservativos e não-conservativos da cultura da soja no modelo AquaCrop – FAO.

| SOJA – AquaCrop – FAO | | |
|---|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Parâmetro | Tipo ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ | Valor / intervalo |
| 1. Fenologia do Cultivo | | |
| Temperatura Basal (°C) | Conservativo ⁽¹⁾ | 5 |
| Temperatura Superior (°C) | Conservativo ⁽¹⁾ | 30 |
| cco - Cobertura inicial do dossel com 90% | Conservativo ⁽²⁾ | 5 |
| de emergência das plantas (cm ²) | | |
| Número de Plantas por Hectare | Manejo ⁽³⁾ | 250.000-450.000 |
| Tempo da semente até emergência (GDD) | Manejo ⁽³⁾ | 150-300 |
| Coefficiente do Crescimento do Dossel (Fração GDD) | Conservativo ⁽¹⁾ | 0,004 – 0,005 |
| Máxima Cobertura do Dossel (%) | Manejo ⁽³⁾ | QCC ^(*) CC ^(**) |
| Tempo da semente até o início da senescência (GDD) | Cultivar ⁽⁴⁾ | TE ^(***) + 1600 – 2400 |
| Coefficiente de Declínio do Dossel (Fração/GDD) | Conservativo ⁽¹⁾ | 0,015 |
| Tempo da Semente até maturação (Duração do ciclo de cultivo) (GDD) | Cultivar ⁽⁴⁾ | TE ^(***) + 1200 – 2000 |
| Tempo da Semente até a floração (GDD) | Cultivar ⁽⁴⁾ | TE ^(***) + 1000-1500 |
| Duração do estágio de floração (GDD) | Cultivar ⁽⁴⁾ | 400-800 |
| Determinação da colheita ligada à floração | Conservativo ⁽¹⁾ | Sim |
| Profundidade mínima de raiz efetiva (m) | Manejo ⁽³⁾ | 0,30 |
| Profundidade máxima de raiz efetiva (m) | Manejo ⁽³⁾ | Até 2.40 |
| Fator forma para descrição da expansão da zona de raiz | Conservativo ⁽¹⁾ | 1.5 |
| 2. Transpiração do Cultivo | | |
| KC _{TR,X} -Coeficiente de Cultivo considerando a cobertura completa do dossel e antes da senescência | Conservativo ⁽¹⁾ | 1.10 |
| Coefficiente de declínio do cultivo (% dia) | Conservativo ⁽¹⁾ | 0,30 |
| Efeito da cobertura de dossel na redução da evaporação do solo no estágio final do cultivo | Conservativo ⁽¹⁾ | 25 |
| Continua(...) | | |

Continuação (...)

| Parâmetro | Tipo ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ | Valor / intervalo |
|---|---|---------------------------------------|
| 3. Produção de Biomassa e Formação da Produtividade | | |
| WP*- Produtividade da água – WP normalizada para ET ₀ e CO ₂ (gm ⁻²) | Conservativo ⁽¹⁾ | 15 |
| Produtividade da água – WP normalizada para ET ₀ e CO ₂ durante a formação de produtividade (% WP * Formação de produtividade anterior) | Conservativo ⁽¹⁾ | 60 |
| HI- Índice de Colheita (%) | Cultivar ⁽⁴⁾ | 40 |
| Possível aumento (%) do HI devido à stress hídrico antes da floração | Conservativo ⁽¹⁾ | Pequeno |
| Coefficiente descrevendo o impacto positivo de restrição de crescimento do cultivo durante a formação da produtividade no HI. | Conservativo ⁽¹⁾ | Nenhum |
| Coefficiente descrevendo o impacto negativo do fechamento de estômato durante a formação da produtividade no HI | Conservativo ⁽¹⁾ | Forte |
| Aumento máximo permitido (%) no HI específico | Conservativo ⁽¹⁾ | 10 |
| 4. Estresse | | |
| Limite de depleção de água do solo para expansão do dossel - limite superior | Conservativo ⁽¹⁾ | 0.15 |
| Limite de depleção de água do solo para expansão do dossel - limite inferior | Conservativo ⁽¹⁾ | 0.65 |
| Fator forma para stress hídrico coeficiente para expansão do dossel | Conservativo ⁽¹⁾ | 3.0 |
| Limite de depleção de água do solo para controle do estômato – Limite superior | Conservativo ⁽¹⁾ | 0.60 |
| Fator forma para stress hídrico coeficiente para controle do estômato | Conservativo ⁽¹⁾ | 3.0 |
| Limite de depleção de água do solo para senescência do dossel – Limite superior | Conservativo ⁽¹⁾ | 0.70 |
| Fator forma para stress hídrico coeficiente para senescência do dossel | Conservativo ⁽¹⁾ | 3.0 |
| Limite de depleção de água do solo para falha na polinização – Limite superior | Conservativo ⁽¹⁾ | 0.85 (estimado) |
| Volume (%) no ponto anaeróbico (Com referência de saturação) | Cultivar ⁽⁴⁾ / Ambiente ⁽³⁾ | Moderadamente tolerante ao alagamento |

Continua(...)

Continuação (...)

| Parâmetro | Tipo ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ | Valor / intervalo |
|--|-------------------------------------|--------------------------|
| 4. Estresse | | |
| Temperatura mínima do ar em que a polinização começa a falhar – Cold Stress – (°C) | Conservativo ⁽¹⁾ | 8 (estimado) |
| Temperatura máxima do ar em que a polinização começa a falhar – Heat Stress – (°C) | Conservativo ⁽¹⁾ | 40 (estimado) |
| Mínimo de graus dias requerido para completa produção de biomassa (°C – day) | Conservativo ⁽¹⁾ | 10(estimado) |
| Condutividade elétrica no método soil-paste extract – Limite inferior (Onde o stress de salinidade começa a ocorrer) | Conservativo ⁽¹⁾ | 5.5 |
| Condutividade elétrica no método soil-paste extract – Limite superior (Onde o stress de salinidade atinge o efeito máximo) | Conservativo ⁽¹⁾ | 10 |

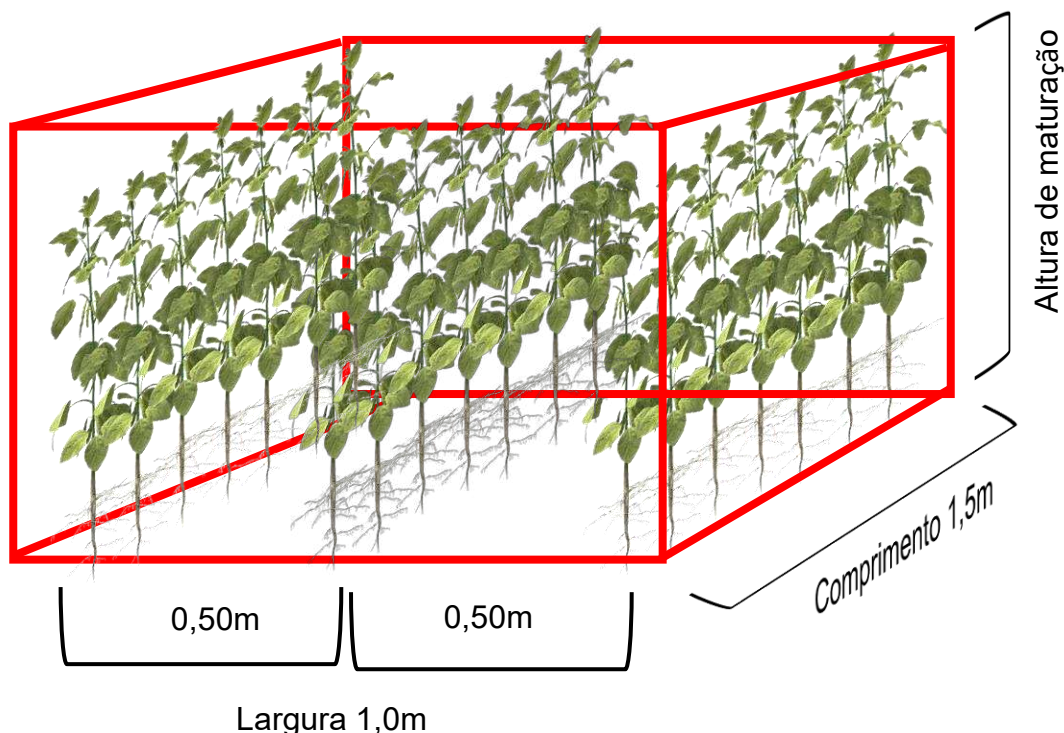
(1) Conservativo -Geralmente aplicável; (2) Conservativo para uma espécie, no entanto pode ser específico do cultivar; (3) Dependente do ambiente e ou manejo; (4) Específico do Cultivar; (*) Quase completamente coberto; (**) Completamente coberto; (***) Tempo para emergência. Fonte:Raes et al., 2023.

3.7 Estimativa dos valores de HI e WP

A partir da padronização do layout do experimento e condições equalitárias (área da parcela, plantas/parcela, espaçamento, dia de plantio e condições edafoclimáticas), foi possível elaborar uma metodologia com uma abordagem empírica em busca de se identificar uma relação matemática para explicar o desempenho do cultivo de acordo com as características das variáveis de entrada do modelo AquaCrop.

Foi adotado uma abordagem volumétrica para a estimativa de biomassa produzida por parcela. As dimensões das parcelas foram padronizadas (1 metro de largura x 1,5 metros de comprimento) gerando uma área de parcela de 1,5m². A partir deste valor, considerou-se a altura de maturação para converter a área da parcela em volume de biomassa (Figura 4).

Figura 4- Esquema do espaçamento de cada parcela.



Fonte: Autora (2024).

A partir da aplicação dessa abordagem volumétrica, foi considerado o volume de biomassa, o respectivo peso de grãos por parcela e duração do ciclo. Uma relação matemática para estimar os coeficientes de Índice de Colheita – HI% e Produtividade de água WP kg/m³ foi elaborado a partir da compreensão da atuação dos respectivos índices no modelo.

O modelo AquaCrop estima a produção de biomassa e corrige esse valor para peso de grãos através da multiplicação pelo índice de colheita. Esse índice por sua vez representa a proporção de peso do grão em relação ao peso total da planta. Foi proposto um índice de colheita adaptado, levando em consideração o peso de grãos (kg) dividido pelo volume de biomassa da parcela (m³), conforme de descrito na equação 2.

$$HI_{adaptado} = \frac{\text{Peso grãos (kg)}}{\text{Volume Biomassa (m}^3\text{)}} \quad (2)$$

Tendo em vista que todas as parcelas foram plantadas no mesmo dia, receberam os mesmos tratos culturais e estavam sujeitas às mesmas condições edafoclimáticas, foi considerado uma relação de taxa de crescimento, levando em

conta a relação do volume de biomassa da parcela dividido pelos dias de maturação, nos fornecendo uma ideia de produção de biomassa diário (m^3/dia) que se relaciona com o índice de produtividade de água WP (kg/m^3) descrito na equação abaixo.

$$\text{Taxa de Crescimento} = \frac{\text{Volume de Biomassa}(m^3)}{\text{Dias de Maturação}} \quad (3)$$

Para correlacionar os valores do *HI adaptado* e de *Taxa de crescimento* com os possíveis valores de HI% e WP de entrada no modelo, foi elaborado uma matriz para cada variável com seis valores atribuídos inicialmente em um intervalo de 0,45 a 0,7 para HI% e de 15 a 20 para WP distribuídos equitativamente, considerando uma interpolação simples.

Em ambos os casos, foi considerado uma relação proporcional, onde os menores valores das novas variáveis (HI adaptado e Taxa de Crescimento) foram correspondentes aos menores valores das variáveis de entrada do modelo (HI% e WP). A mesma lógica foi aplicada para os maiores valores.

Uma interpolação linear para obtenção dos valores para todos os genótipos do grupo foi aplicada através da função *PREVISÃO.LINEAR* do Microsoft Excel, possibilitando uma previsão de um valor futuro considerando como referência as respectivas matrizes com seis pares de valores previamente elaborada. A equação da previsão linear é apresentada a seguir:

$$\text{Previsão Linear} = a + bx \quad (4)$$

$$\text{Sendo: } a = \bar{y} - b\bar{X} \text{ e } b = \frac{\sum(X-\bar{X})(y-\bar{y})}{\sum(X-\bar{X})^2}$$

Onde x e y são as médias de amostra (X valores conhecidos das novas variáveis e Y valores atribuídos das variáveis HI e WP).

3.8 Avaliação do desempenho do modelo agrometeorológico

O processo de calibração ocorreu a partir da avaliação do desempenho do modelo AquaCrop, e será baseada na precisão do modelo em simular a produtividade observada na região de interesse. Uma combinação de vários parâmetros estatísticos

foi aplicada para avaliar o desempenho do modelo, uma vez que não existe uma única estatística mais robusta do que outras (Yang et al., 2014). Neste estudo, o coeficiente de determinação (R^2), erro médio absoluto (MAE), raiz quadrada do erro médio (RMSE), erro médio percentual absoluto (MAPE), raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado (NRMSE), e o índice de eficiência (EF) foram utilizados para avaliar o desempenho do AquaCrop.

$$r^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2)(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - P_i}{O_i} \right) \quad (8)$$

$$NRMSE = \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum O_i^2} \quad (9)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

Em que:

P_i – valores simulados pelo AquaCrop;

O_i - valores observados;

n - número de observações;

\bar{O} - é a média dos valores observados;

\bar{P} - é a média dos valores simulados.

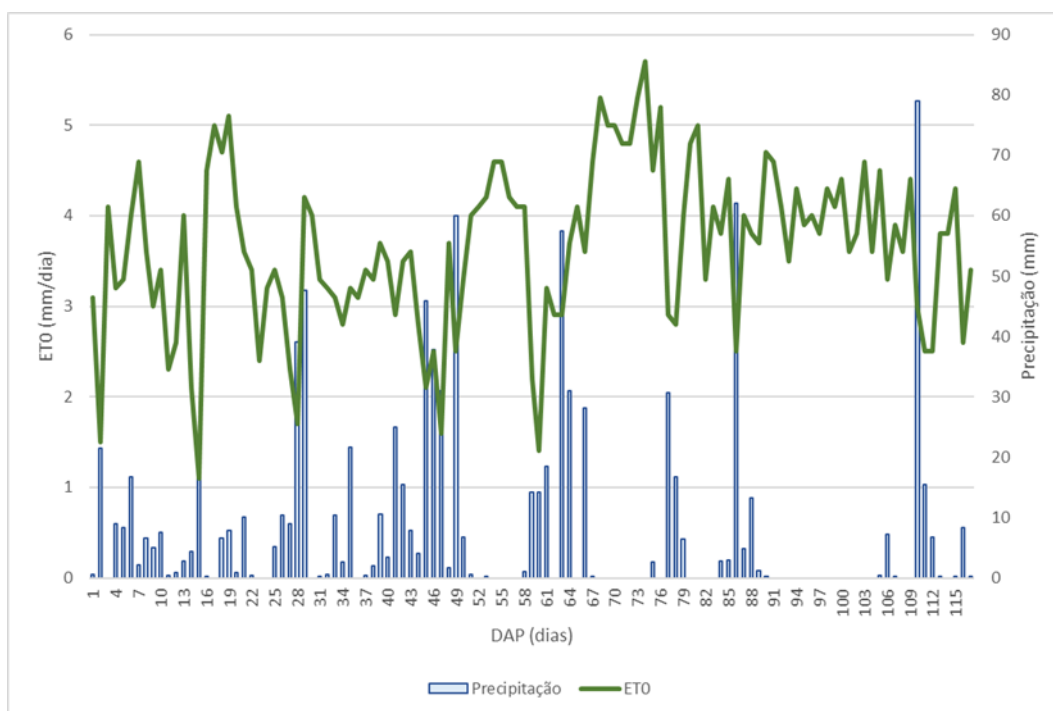
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variáveis meteorológicas

As variáveis meteorológicas foram monitoradas diariamente a partir dos dados obtidos da estação meteorológica do INMET instalada no município de Viçosa - MG. Durante o ciclo de cultivo, destaca-se o elevado volume de precipitação acumulado de 956,2 mm ao longo de 117 dias e sua respectiva distribuição em 55 eventos (dias com precipitação), possibilitando uma precipitação média de 17,4 mm/evento com valor máximo de 79 mm e mínimo de 2mm (Figura 5). Com uma precipitação bem distribuída, o experimento passou por 19 intervalos sem o suprimento de água (dias sem precipitação) com uma média de duração de 3,3 dias/intervalo e um veranico entre os dias 89 e 106 com 17 dias sem precipitação.

A necessidade total de água na cultura da soja, para obtenção do máximo rendimento, varia entre 450 e 800 mm/ciclo, dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo. A demanda hídrica no cultivo aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm/dia), decrescendo após esse período. Déficits hídricos expressivos, durante a floração e o enchimento de grãos, provocam alterações fisiológicas na planta, como o fechamento estomático e o enrolamento de folhas e, como consequência, causam a queda prematura de folhas e de flores e abortamento de vagens, resultando, por fim, em redução do rendimento de grãos (Embrapa, 2013).

Figura 5- Variações das precipitações e ETo durante o ciclo de cultivo da soja, no período de 23 de novembro de 2022 a 20 de março de 2023, em Viçosa-MG.



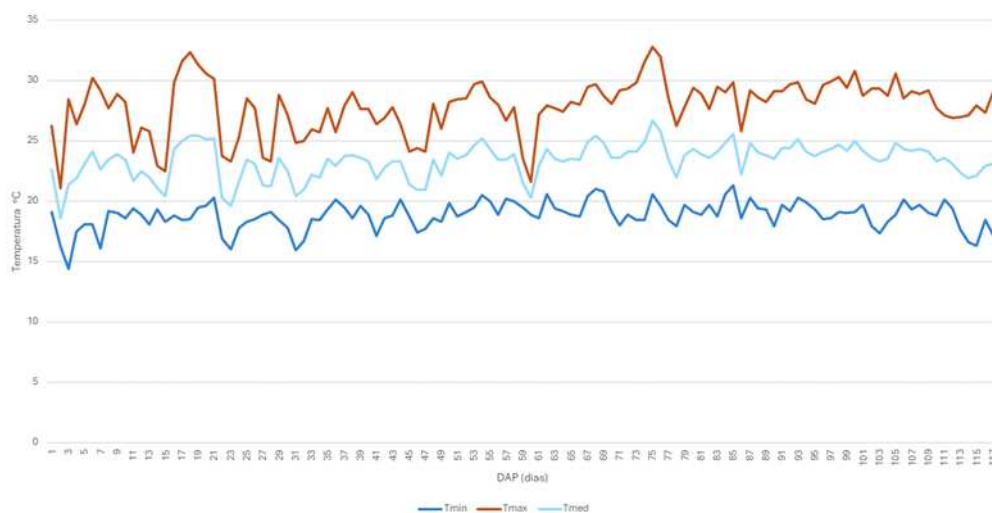
Fonte: Autora (2024).

A partir das variáveis meteorológicas coletadas foi calculado a evapotranspiração de referência pelo método Penman-Monteith – FAO 56 (Allen et al., 1998). Os valores de ETo acumulado variaram de 388 mm para o grupo de maturação precoce e 425,8 mm para o grupo de maturação tardio, com os valores de 3,66 e 3,64mm/dia de média respectivamente. O pico de ETo (5,7 mm/dia) ocorreu no DAP 74 (04/02/2023) após um período de 7 dias sem precipitação e elevados valores de temperatura, já o menor valor (1,1 mm) ocorreu no DAP 15 (07/12/2022) após um dia chuvoso e doze dias consecutivos de chuva. A evapotranspiração é um dos principais fatores da relação solo, planta, água e atmosfera, porque o nível de água utilizada pela cultura é diretamente relacionado ao desenvolvimento de estresse nas plantas (Allen et al., 1998).

As maiores temperaturas se concentraram na parte final do ciclo, coincidindo com a redução dos eventos de precipitação (Figura 6). O pico de temperatura foi de 32,8 °C no DAP 75 onde ambos os grupos de maturação se encontravam no estágio fenológico IV. A temperatura é um fator importante para o desenvolvimento da cultura, sendo que a faixa de melhor adaptação fica entre 20 e 30 °C, e a temperatura ideal é

em torno de 30°C. Temperaturas iguais ou inferiores a 10 °C paralisam o crescimento vegetativo e temperaturas acima de 40 °C podem interferir no florescimento e ocasionar abortamento de vagens (Embrapa, 2013; Casaroli et al., 2007).

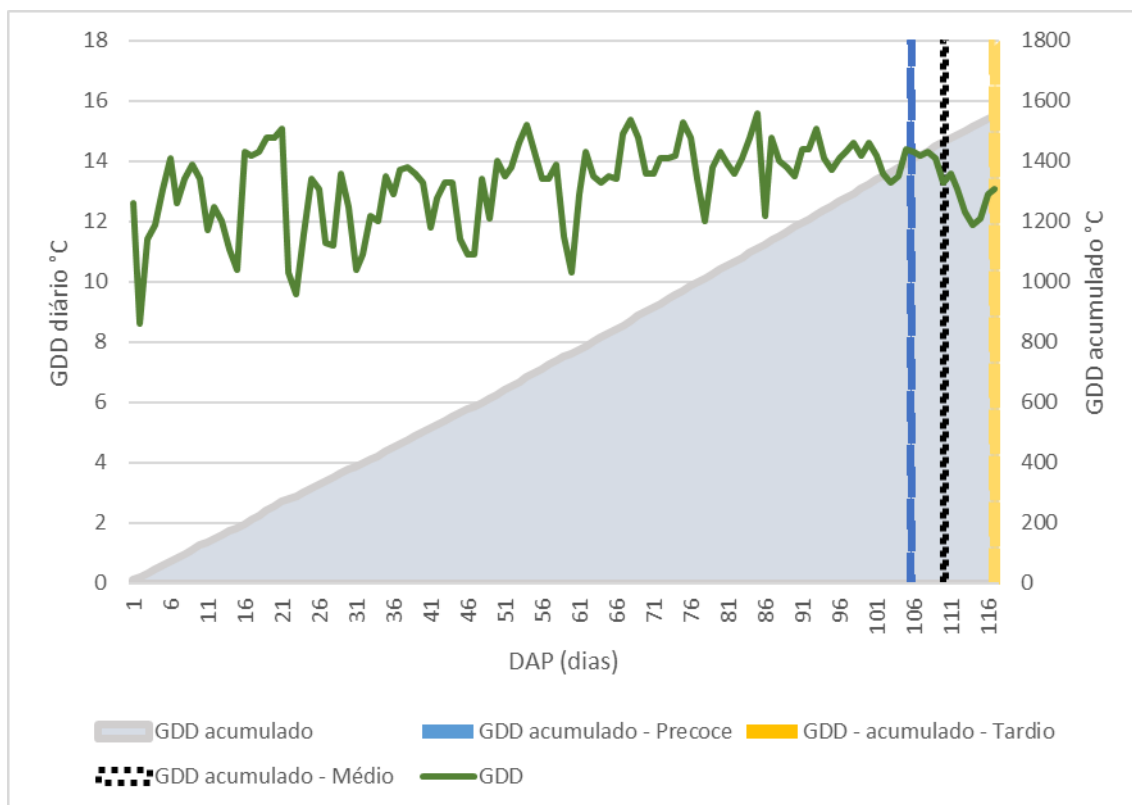
Figura 6- Variação das temperaturas máxima, média e mínima, durante o ciclo de cultivo da soja, no período de 23 de novembro de 2022 a 20 de março de 2023, em Viçosa-MG.



Fonte: Autora (2024).

As condições climáticas deste estudo não apresentaram condições limitantes ao crescimento do cultivo em relação a temperaturas extremas, além disso o acúmulo de graus dias foi calculado para cada grupo, sendo os acumulados: 1407, 1463 e 1522 °C do mais precoce ao mais tardio (Figura 7).

Figura 7- Cálculo de graus dias diário (GDD) e acumulado para os três grupos de maturação.

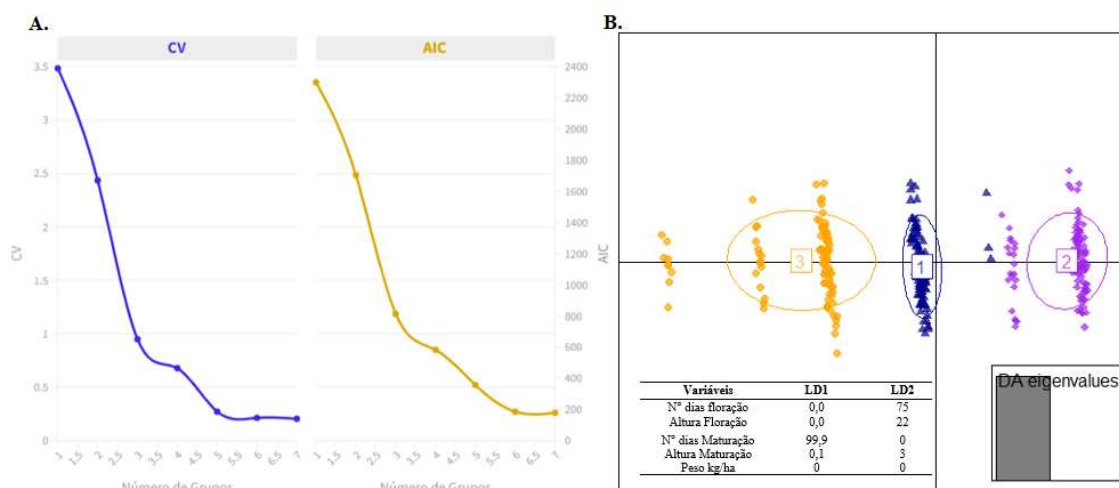


Fonte: Autora (2024).

4.2 Agrupamento e diversidade genética

Os genótipos em estudo foram estratificados em três grupos principais a partir do agrupamento *k-means*. A identificação do número ideal de grupos se deu a partir da análise do coeficiente de variação e AIC, onde a partir do terceiro grupo os ganhos não foram representativos a ponto de incluirmos um quarto grupo no processo de agrupamento (Figura 8). A partir do terceiro grupo observou-se uma mudança no perfil da curva e a presença de um ponto de inflexão, o que simboliza uma redução na explicação da variância. Priorizou-se em manter três grandes grupos que representasse o máximo possível de variação, e um agrupamento subsequente dentro dos respectivos grupos para as análises posteriores.

Figura 8- A: Coeficiente médio de variação (CV) da distância Euclidiana entre os grupos de genótipos para a característica maturação para k agrupamentos e **B:** Análise de Componentes Principais (PCA) para os três grupos formados e a contribuição de cada variável em porcentagem nos componentes.



Fonte: Autora (2024).

Após a estratificação em três grandes grupos, foi identificada a contribuição das variáveis no processo de agrupamento, o componente principal 1 representado pelo eixo x na horizontal foi explicado quase que na sua totalidade (99,9%) pela variável “nº de dias para a maturação”, seguido pela variável altura de maturação com apenas 0,1%. A partir dessa elevada contribuição dos dias de maturação, foi possível alocar os genótipos em estudo em três grupos de maturação bem definidos. O componente principal 2 foi explicado em sua maior parte pelas informações relacionadas à floração – dias para floração com 75% da explicação, seguido pela altura de floração com 22%.

A estratificação por ciclo é de suma importância visto que os programas de melhoramento genético, atualmente, prezam por cultivares mais precoces. De acordo com Soares et al. (2018), ciclos mais precoces favorecem à antecipação da colheita e o plantio da cultura em sucessão na segunda safra em tempo hábil quanto às condições climáticas.

A avaliação dos caracteres relacionados ao número de dias para o florescimento e o número de dias para a maturidade é essencial em programas de melhoramento, pois segundo Sedyama et al. (2015), a produtividade de um genótipo

está diretamente relacionada ao número de nós na haste principal, sendo este um caráter importante no processo de seleção de linhagens. Outro ponto importante é que o número de dias de floração é determinante no estabelecimento do ciclo de uma cultivar. Pois ele determina o final do ciclo vegetativo da soja, que é o período de extrema importância para obtenção de altas produtividades de grãos, uma vez que é nessa fase que ocorre a formação das folhas e de todo aparato para a produção de fotoassimilados (Almeida et al., 2013).

Apenas a variável produtividade (kg/ha) não apresentou contribuição na análise de componentes principais, o que nos mostra a importância das variáveis fenotípicas na explicação das variabilidades e diversidade genética.

Após a estratificação dos genótipos em três grandes grupos e identificação das variáveis de contribuição e seu respectivo peso, uma nova análise de componentes principais com um processo de agrupamento foi aplicado dentro de cada grupo e as variáveis de contribuição foram identificadas (Tabela 3).

Tabela 3- Contribuição relativa de cada variável em porcentagem na explicação da variação total dentro de cada grupo de genótipos.

| Variáveis | Grupos | | |
|-------------------|--------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Nº dias Floração | 0 | 0 | 0 |
| Altura Floração | 14,16 | 0 | 0 |
| Nº dias Maturação | 0 | 99,9 | 99,9 |
| Altura Maturação | 85,81 | 0 | 0 |
| Produtividade | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Autora (2024).

Observa-se nos dados da análise de PCA por grupos, que o grupo 1 obteve uma maior contribuição das variáveis relacionadas à produção de biomassa, altura de maturação e floração, com uma contribuição de 85,8% e 14,2% respectivamente. Por outro lado, os grupos 2 e 3 foram explicados pela informação relacionada ao ciclo do cultivo, com uma contribuição de 99,9% da variável dias de maturação.

A partir da análise de PCA e agrupamento para a formação de subgrupos de acordo com cada grupo principal, foi gerado oito subgrupos, sendo 2 dentro do grupo 1 e três subgrupos para o grupo 2 e 3 respectivamente. De acordo com a metodologia proposta, apenas os grupos estatisticamente diferentes foram mantidos, os detalhes estão apresentados na Tabela 4.

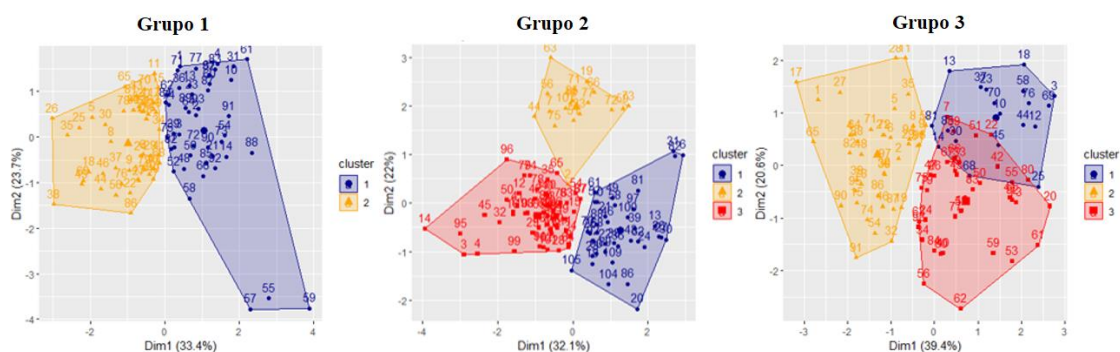
Tabela 4- Comparação múltipla das médias pelo teste de Tukey comparando os subgrupos formados pelo PCA para as principais variáveis.

| Grupo | Variável | Subgrupos | | Diferença | Limite inferior | Limite superior | p ajustado |
|---------|----------|-----------|---|-----------|-----------------|-----------------|------------|
| Grupo 1 | Alt Flor | 2 | 1 | -8,63 | -10,56 | -6,7 | <0,01 |
| | Alt Mat | 2 | 1 | -15,98 | -19,14 | -12,81 | <0,01 |
| Grupo 2 | N° D Mat | 2 | 1 | -2,76 | -3,09 | -2,43 | <0,01 |
| | | 3 | 1 | 0,23 | -0,12 | 0,47 | <0,05 |
| | | 3 | 2 | 3 | 2,68 | 3,31 | <0,01 |
| Grupo 3 | N°D Mat | 2 | 1 | 4,82 | 4,08 | 5,55 | <0,01 |
| | | 3 | 1 | 4,57 | 3,82 | 5,31 | <0,01 |
| | | 3 | 2 | -0,25 | -0,85 | 0,35 | <0,05 |

Fonte: Autora (2024).

Os grupos e seus respectivos subgrupos estão representados na Figura 9 e na Tabela 5, e destacam-se que a metodologia proposta possibilitou a estratificação de grupos bem definidos. A variável dias de maturação se mostrou como a variável mais explicativa, a que concentra a maior parte da explicação da variância entre os genótipos. A estratificação de grupos por duração de ciclos, facilita a aplicação do modelo agrometeorológico AquaCrop, que possui uma lógica de cálculo ancorada na distribuição do ciclo.

Figura 9- Análise de Componentes Principais (PCA) para os subgrupos formados a partir dos 3 grupos iniciais, classificados como: grupo 1-médio; 2-tardio; e 3-precoce.



Fonte: Autora (2024).

Tabela 5- Valores dos 5 caracteres agrônômicos avaliados para os respectivos grupos e subgrupos.

| | Subgrupo | Dias de Florescimento | Altura de Florescimento (cm) | Dias de Maturação | Altura de maturação (cm) | Produtividade (kg/ha) |
|---------|----------|-----------------------|------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|
| Grupo 1 | 1 | 38,7 | 41,8 | 110,2 | 93,7 | 5908,4 |
| | 2 | 38,9 | 33,1 | 110,0 | 77,7 | 5222,2 |
| Grupo 2 | 1 | 38,4 | 34,7 | 116,8 | 82,5 | 5105,4 |
| | 2 | 39,2 | 38,1 | 114,0 | 95,4 | 6734,3 |
| | 3 | 40,2 | 43,0 | 117,0 | 98,3 | 6625,4 |
| Grupo 3 | 1 | 36,7 | 37,2 | 101,1 | 73,2 | 4722,7 |
| | 2 | 38,9 | 42,3 | 105,9 | 91,5 | 5515,4 |
| | 3 | 37,6 | 31,7 | 105,7 | 75,5 | 4544,2 |

Fonte: Autora (2024).

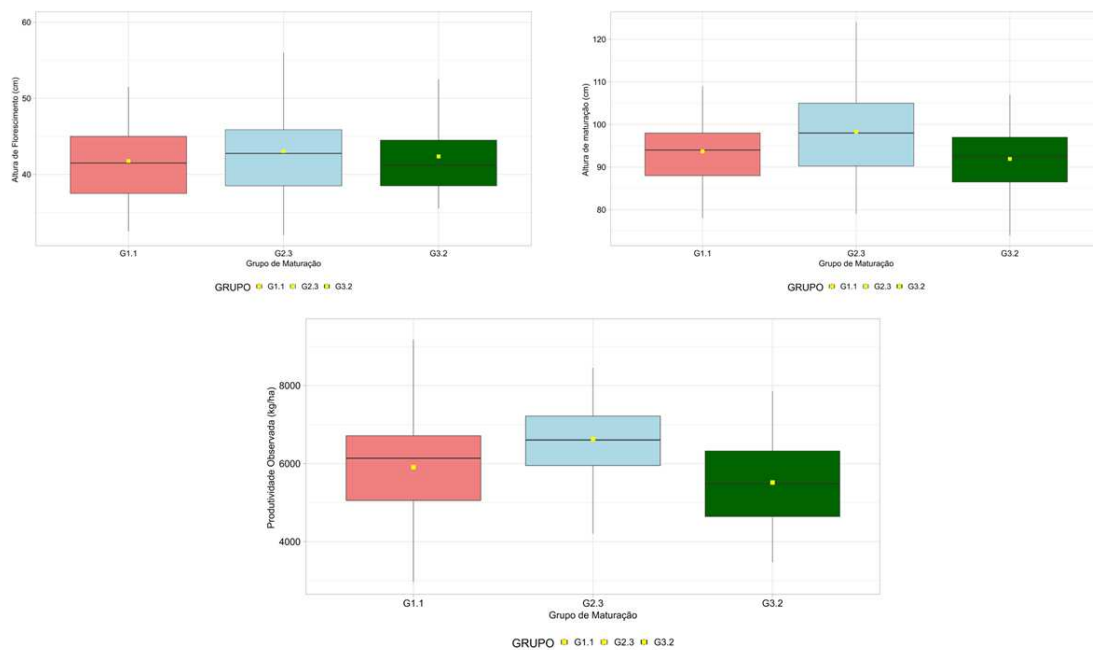
Os genótipos alocados no grupo 2 obtiveram a maior média de produtividade com 6118,1 kg/ha, seguidos pelos grupos 1 e 3 com 5554,2 e 4885,8 kg/ha respectivamente. A produtividade se mostrou positivamente relacionada à variável dias de maturação, onde as maiores produtividades foram obtidas nos genótipos de ciclo mais longo. Essa associação entre alturas de plantas e produtividade de grãos na cultura da soja também foi verificada por Pereira et al. (2017), Umburanas et al. (2019) e De Carvalho et al. (2020), em que estes relatam o fato de que plantas mais altas podem ser favoráveis para maior interceptação da luz e como consequência maior assimilação de fotoassimilados.

4.3 Caracterização dos subgrupos para calibração

Foram selecionados os seguintes subgrupos para aplicação da metodologia proposta e calibração do modelo: Grupo 1 – Subgrupo 1 (G1.1); Grupo 2 – Subgrupo 3 (G2.3); Grupo 3 – Subgrupo 2 (G3.2). O subgrupo G2.3 apresentou um melhor desempenho de produtividade com uma média de 6625,4 kg/ha e uma menor dispersão dos dados de produtividade com um intervalo de 4203 – 9393kg/ha e um coeficiente de variação de 15,5%. O grupo também obteve os maiores valores para as variáveis relacionadas à produção de biomassa, altura do florescimento e maturação (Figura 10). Dentro dos subgrupos analisados, o G1.1 se apresentou com uma maior variabilidade da produtividade (cv = 25%) com resultados distribuídos em um intervalo de 2968 – 9174 kg/ha e uma produtividade média de 5908,4 kg/ha. A

variabilidade do G3.2 de 23% e apresentou um intervalo de 3474,4- 9339,0kg/ha com uma média de 5515,4 kg/ha.

Figura 10- Box plot dos 3 subgrupos dos genótipos formados em relação à altura de maturação, altura de floração e produtividade.



Fonte: Autora (2024).

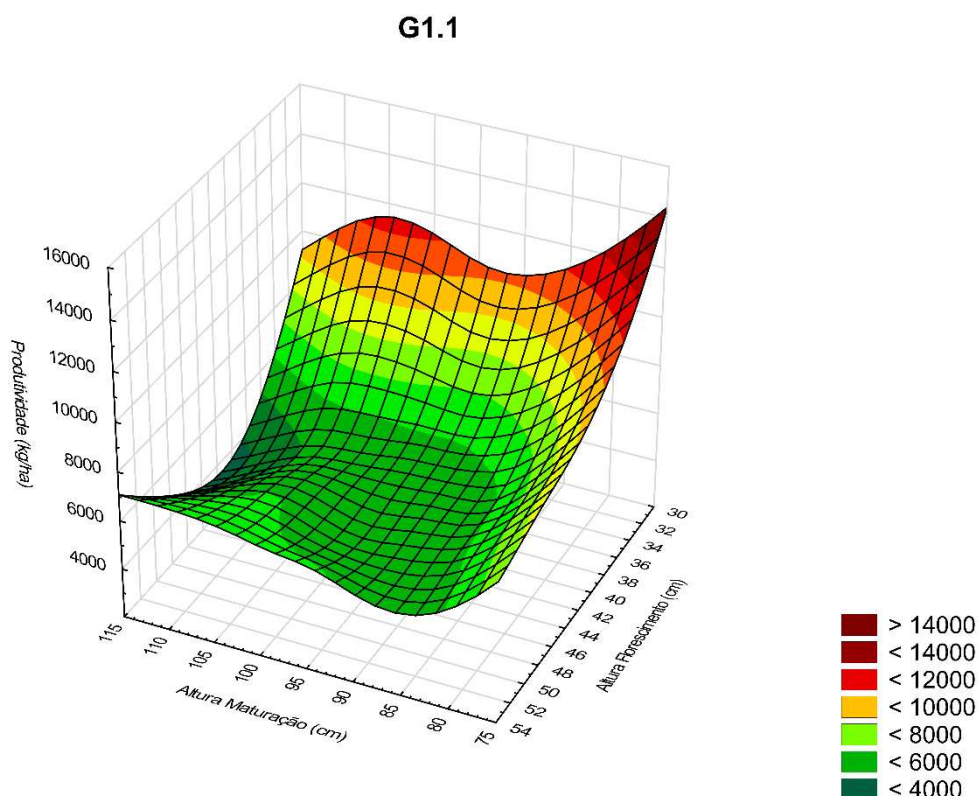
O mesmo padrão de comportamento foi observado para a variável altura de maturação, onde as maiores produtividades foram encontradas no grupo com maior altura de maturação. Essa informação se relaciona diretamente à metodologia proposta de utilização da altura de maturação e consequentemente volume de biomassa para a estimativa de HI e consequentemente produtividade estimada.

De acordo com Rocha et al. (2012), a altura da planta é imprescindível na determinação da cultivar a ser inserida em uma região, pois está relacionada com o rendimento de grãos, controle de plantas daninhas e perdas durante a colheita mecanizada.

Em uma análise mais detalhada do G1.1, observou-se um padrão de predomínio das maiores produtividades nos genótipos com menor altura de floração. Os menores rendimentos se concentraram nos genótipos com uma altura de maturação maior. No entanto, observa-se pela análise gráfica da Figura 11, a influência das variáveis altura de floração e altura de maturação e sua respectiva correlação com a produtividade, corroborando com o resultado da PCA

apresentada na Tabela 4, onde destacou a importância e contribuição dessas variáveis o processo de agrupamento do GRUPO 1.

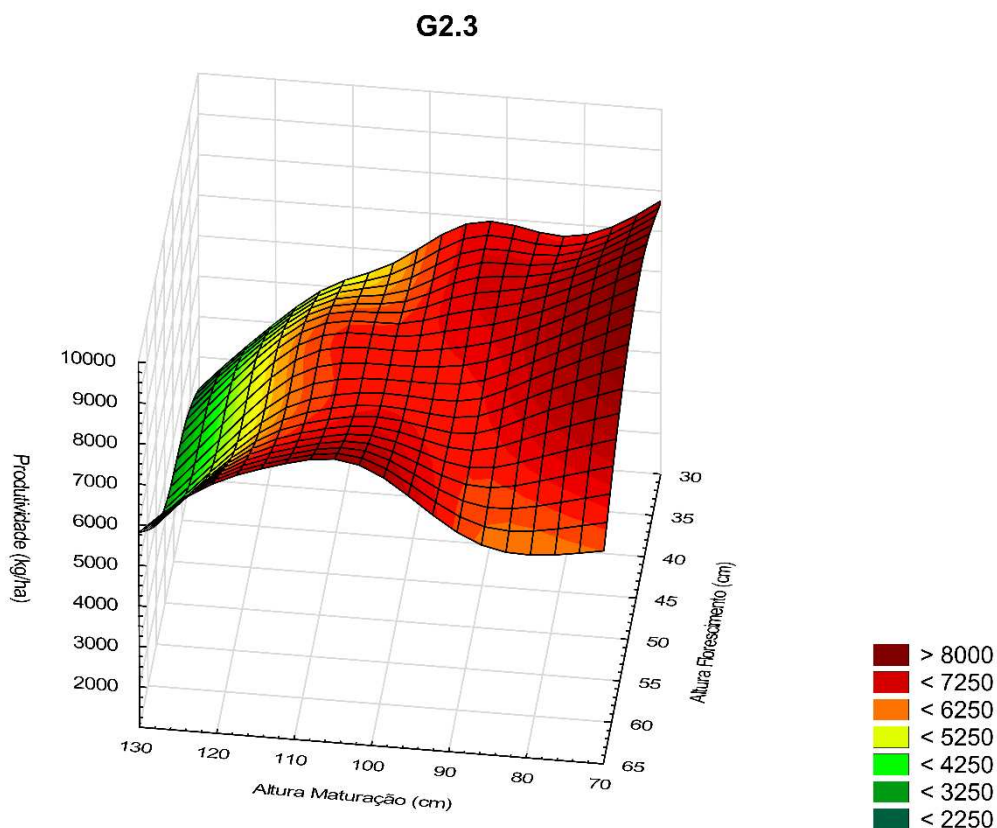
Figura 11- Gráfico de superfície tridimensional do grupo G1.1 correlacionando as variáveis altura do florescimento, altura da maturação e produtividade, através do método dos mínimos quadrados ponderados.



Fonte: Autora (2024).

O grupo G2.3 que apresenta o maior ciclo de cultivo, expressou um comportamento uniforme em relação ao desempenho dos genótipos em função da altura de maturação (Figura 12). Os maiores rendimentos foram obtidos nos genótipos com menor altura de maturação. A variável altura do florescimento não contribuiu para este comportamento. Os menores valores de produtividade ficaram concentrados nos genótipos com maior duração de ciclo.

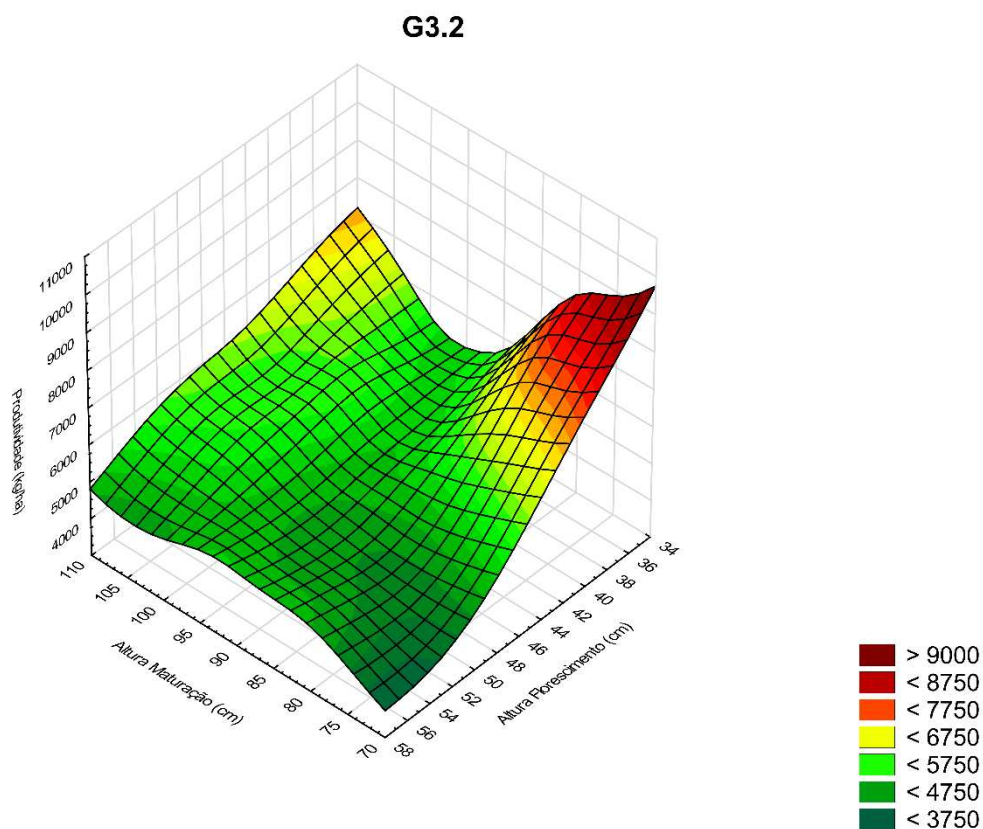
Figura 12- Gráfico de superfície tridimensional do grupo G2.3 correlacionando as variáveis altura do florescimento, altura da maturação e produtividade, através do método dos mínimos quadrados ponderados.



Fonte: Autora (2024).

O Grupo G3.2 representam os genótipos com menor duração de ciclo. O gráfico de superfície do grupo apresentou um perfil diverso com a presença de dois picos produtivos para situações diversas de altura de maturação (Figura 13). No entanto, as maiores produtividades se concentraram nos genótipos com menor altura de florescimento.

Figura 13- Gráfico de superfície tridimensional do grupo G3.2 correlacionando as variáveis altura do florescimento, altura da maturação e produtividade, através do método dos mínimos quadrados ponderados.



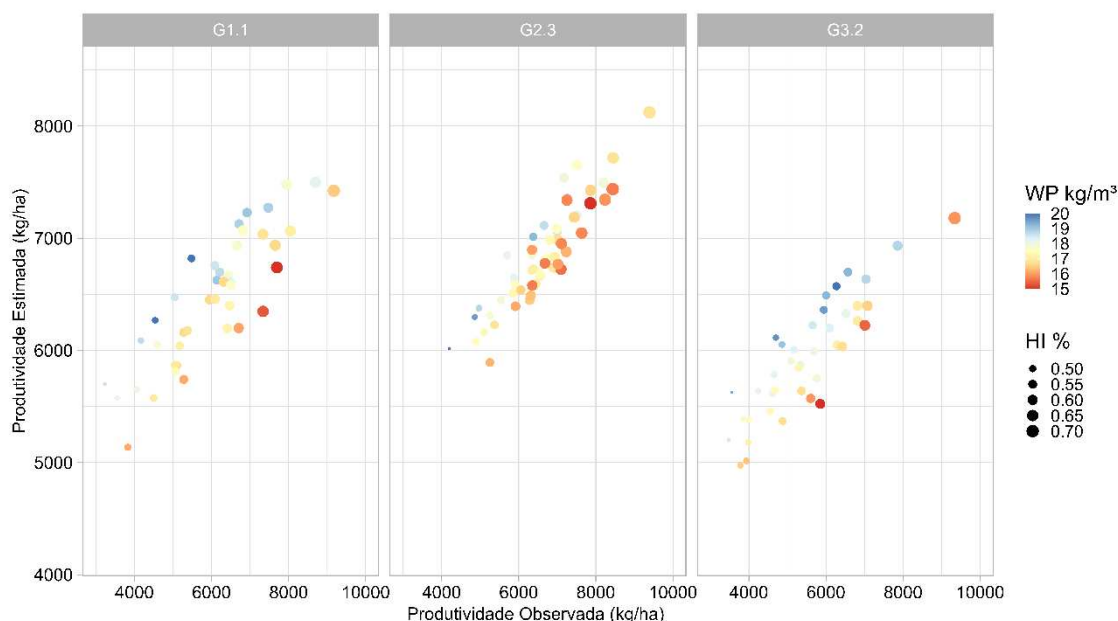
Fonte: Autora (2024).

4.4 Calibração do modelo

A partir da metodologia proposta, com uma abordagem volumétrica da produção de biomassa em relação à cada genótipo, foi possível estimar os valores de entrada de HI e WP no modelo AquaCrop. Os valores dos coeficientes variaram de acordo com o perfil e comportamento dos genótipos de cada grupo. Os valores médios do índice de colheita – HI% foram maiores no grupo G2.3, seguidos pelo G1.1 e G3.2, com os respectivos valores 0,58; 0,55 e 0,53. O mesmo padrão foi observado para as variáveis altura de maturação e produtividade. O comportamento do WP foi inversamente proporcional ao HI, onde o grupo G3.3 apresentou uma média de 17,7 kg/m³ seguido pelo G1.1 e G2.3 com valores médios de 17,5 e 17,1 respectivamente (Figura 14).

De acordo com a metodologia proposta, os valores de WP são maiores nos genótipos que apresentaram uma maior taxa de crescimento (m^3/dia). Esses genótipos se apresentaram no grupo de ciclo mais curto (G3.3), onde a altura de maturação média foi 91,9 cm e o ciclo de 106 dias. Com uma duração de ciclo menor (denominador), a taxa de crescimento proporcional será afetada positivamente e consequentemente irá permitir maiores valores de WP. O inverso ocorreu no grupo G2.3, onde o valor médio de WP foi de 17,5 com uma maior duração do ciclo (denominador) penalizando a estimativa de taxa de crescimento e consequentemente WP.

Figura 14- Distribuição dos valores dos parâmetros WP e HI entre os três grupos formados para calibração do modelo.

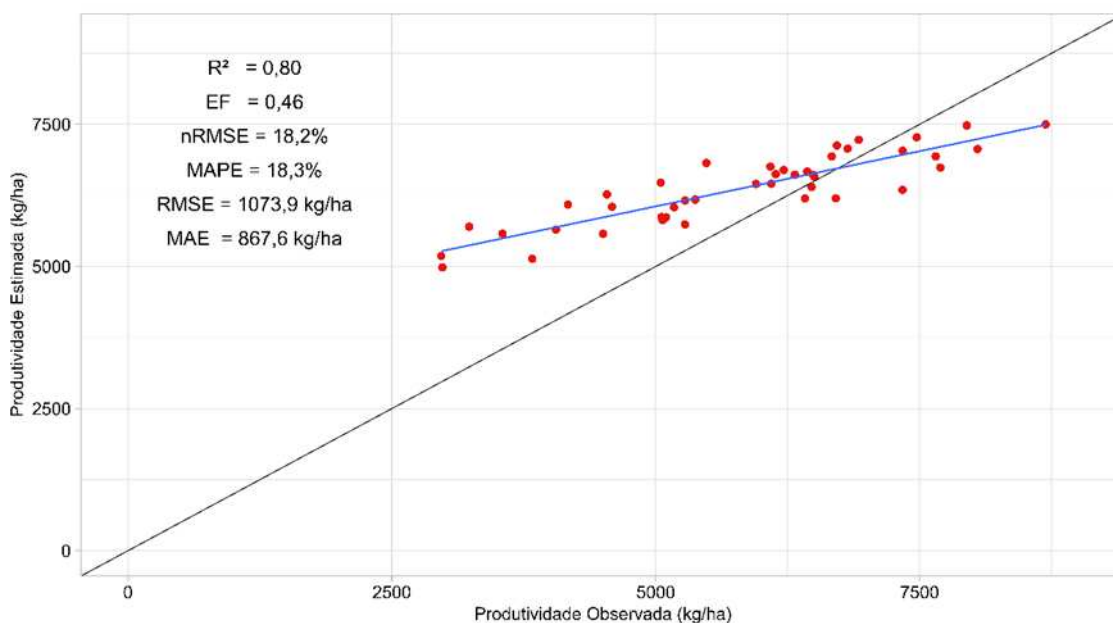


Fonte: Autora (2024).

Considerando as condições edafoclimáticas do experimento, o G3.3 apresentou um menor porte e duração de ciclo, ocasionando uma maior eficiência na produção de biomassa, no entanto a conversão de biomassa em produto de interesse penalizou a produtividade final. Já o G2.3, apresenta um ciclo mais longo e uma maior altura de maturação, o que levou a uma menor eficiência em relação produção de biomassa, no entanto com um índice de colheita que favoreceu a produtividade de grãos.

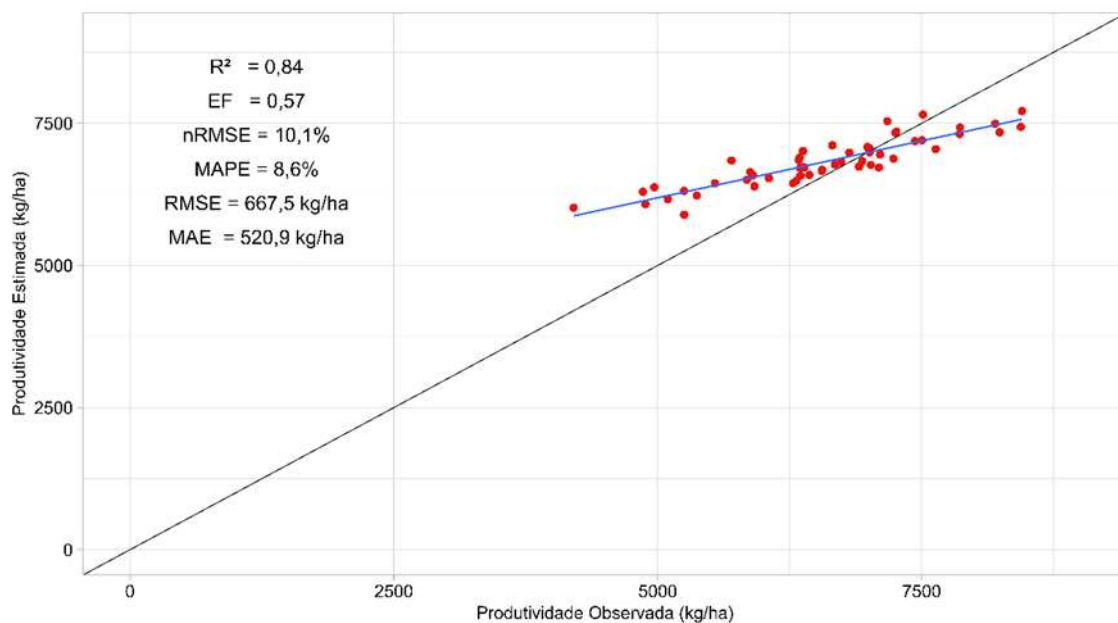
Com a finalidade de averiguar os resultados observados, realizou-se uma análise de regressão linear para a produtividade observada e simulada (Figuras 15,16 e 17) para cada um dos grupos. Os coeficientes de determinação (R^2) foram respectivamente: 0,80; 0,84; e 0,77. Apesar de encontrados valores considerados altos, eles por si só não podem prever se o modelo explica bem os dados avaliados. Segundo Shalizi (2015), dentre os questionamentos contra o R^2 para avaliação desses modelos estão a sua forma não confiável no ajuste de medição e não abrange os erros de previsão. O NRMSE variou entre 10,1 e 18,2 %. Essa métrica reflete a diferença entre as médias encontradas no campo e as simuladas em relação à média dos dados observados e de acordo com Adeboye et al. (2021) e Jamieson et al. (2011), os valores encontrados para esses grupos são considerados bons.

Figura 15- Análise de regressão linear do grupo G1.1 e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2); de eficiência (EF); raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado (NRMSE); erro médio percentual absoluto (MAPE); raiz quadrada do erro médio (RMSE); e erro médio absoluto (MAE), obtidos na calibração entre a produtividade observada e simulada entre os genótipos de soja.



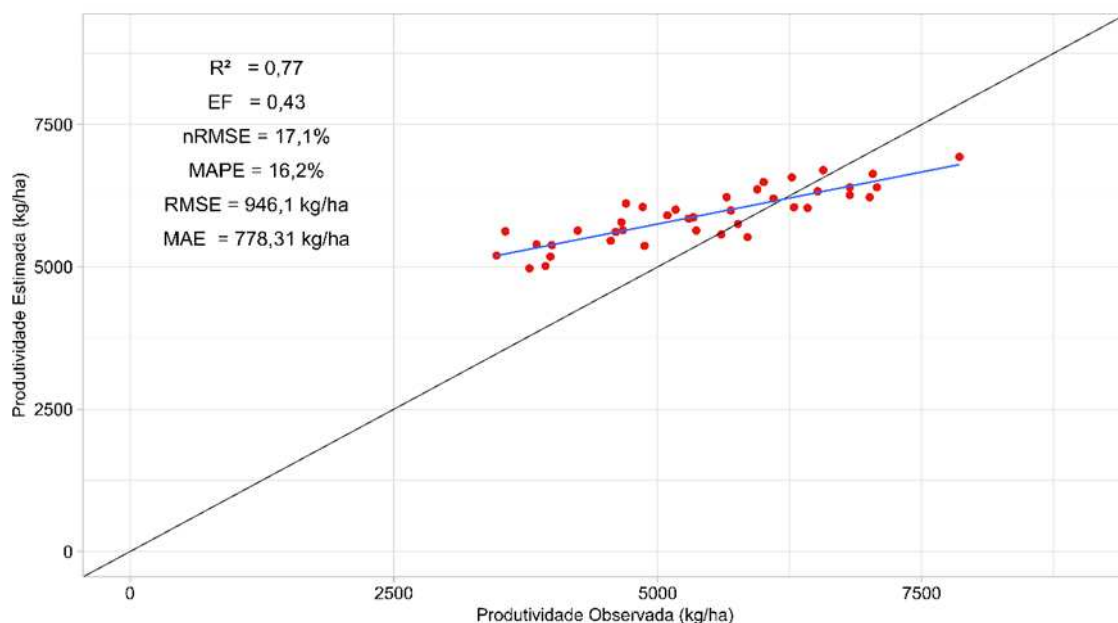
Fonte: Autora (2024).

Figura 16- Análise de regressão linear do grupo G2.3 e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2); de eficiência (EF); raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado (NRMSE); erro médio percentual absoluto (MAPE); raiz quadrada do erro médio (RMSE); e erro médio absoluto (MAE), obtidos na calibração entre a produtividade observada e simulada entre os genótipos de soja.



Fonte: Autora (2024).

Figura 17- Análise de regressão linear do grupo G3.2 e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2); de eficiência (EF); raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado (NRMSE); erro médio percentual absoluto (MAPE); raiz quadrada do erro médio (RMSE); e erro médio absoluto (MAE), obtidos na calibração entre a produtividade observada e simulada entre os genótipos de soja.



Fonte: Autora (2024).

Em relação a métrica EF, os valores ficaram entre 0,43 e 0,57. De acordo com a classificação de Nasf-Sutcliffe (1970), esses valores são considerados satisfatórios em relação a qualidade dos modelos.

5 CONCLUSÕES

O método de agrupamento k-means em conjunto a análise de componentes principais se mostrou eficiente na estratificação dos genótipos para a aplicação do modelo agrometeorológico proposto.

A metodologia proposta para a estimativa dos parâmetros de entrada do modelo agrometeorológico obteve bom desempenho e conseguiu explicar um padrão de comportamento dos subgrupos em análise.

A calibração do modelo obteve resultado satisfatório em relação as métricas avaliadas. conclui-se que por se tratar de um trabalho inédito onde o foco são linhagens, que ainda não se alcançaram a homozigose desejável, e continuam em etapas de seleção no processo de melhoramento, se faz necessário uma análise mais crítica e holística dos resultados obtidos e os respectivos métodos de avaliação.

REFERÊNCIAS

- ADEBOYE, O. B.; SCHULTZ, B.; ADEBOYE, A. P.; ADEKALU, K. O.; OSUNBITAN, J. A. Application of the AquaCrop model in decision support for optimization of nitrogen fertilizer and water productivity of soybeans. **Information Processing in Agriculture**, v. 8, n. 3, p. 419-436, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.10.002>
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, 56, Rome: FAO, 300p., 1998.
- ALMEIDA, F. A.; BRUSCKE, E. L.; POLIZEL, A. C.; PETTER, F. A.; HAMAWAKI, O. T.; ALCÂNTARA NETO, F. Desempenho agronômico de linhagens e cultivares de soja frente a doenças foliares. *Revista de Ciências Agrárias*, Belém, v.56, n.2, p.88-94, 2013.
- AMIRI, E. Calibration and Testing of the Aquacrop Model for Rice under Water and Nitrogen Management. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 47, p. 387–403, 2016. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1123719>
- BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; PICKERING, N. B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal** v. 88, p. 704-716, 1996. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800050005x>
- BORÉM, A.; MIRANDA, C. V.; FRITSCHÉ-NETO, R. **Melhoramento de Plantas**. 7. ed. Viçosa: UFV, 2017. p. 25-496.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2019). **Série histórica das safras**. Brasília: Conab. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/911-soja> >. Acesso em 04.01.2024.
- CASAROLI, D.; FAGAN, E. B.; SIMON, J.; MEDEIROS, P. S.; MANFRON, P. A.; DOURADO NETO, D.; LIER, Q. J.; MÜLLER, L.; MARTIN, T. N. Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura de soja – uma revisão. **Revista da FZVA**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 102-120. 2007.
- CECCARELLI, S. Efficiency of plant breeding. **Crop science**, v. 55, n. 1, p. 87-97, 2015. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.02.0158>
- CONFALONIERI, R.; ORLANDO, F.; PALEARI, L.; STELLA, T.; GILARDELLI, C.; MOVEDI, E.; PAGANI, V.; CAPPELLI, G.; VERTEMARA, A.; ALBERTI, L.; ALBERTI, P.; ATANASSIU, S.; BONAITI, M.; CAPPELLETTI, G.; CERUTI, M.; CONFALONIERI, A.; CORGATELLI, G.; CORTI, P.; DELL'ORO, M.; GHIDONI, A.; LAMARTA, A.; MAGHINI, A.; MAMBRETTI, M.; MANCHIA, A.; MASSONI, G.; MUTTI, P.; PARIANI, S.; PASINI, D.; PESENTI, A.; PIZZAMIGLIO, G.; RAVASIO, A.; REA, A.; SANTORSOLA, D.; SERAFINI, G.; SLAVAZZA, M.; ACUTIS, M. Uncertainty in crop model predictions: What is the role of users? **Environmental Modelling & Software**, v. 81, p.165–173, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.04.009>

CORRÊA, S. T. R.; LORENÇONI, R.; DOURADO NETO D.; SCARPARE, F. V.; VIVIAN, R.; RUIZ, E. T. Aplicações e limitações da modelagem em agricultura: revisão. **Revista de Agricultura**, v. 86, n. 1, p. 1-13, 2011.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. (2014). **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento**. 4^a Ed., UFV, Viçosa. 668 p.

DALLACORT, R.; REZENDE, R.; FREITAS, P.S.L. de; FARIA, R.T.; AZEVEDO, T.L.F.; TOLENTINO JUNIOR, J.B. Utilização do modelo Cropgro-drybean na determinação das melhores épocas de semeadura da cultura do feijão para a região de Maringá, Estado do Paraná, Brasil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 27, n. 2, p. 349–355, 2005. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303026558023>

DE CARVALHO, E. V.; PELUZIO, J. M.; FREIBERGER, C. N.; PROVENCI, L. Z.; DOS SANTOS MOTA, W. C. A época de semeadura na produção de sementes de soja em condições de várzea tropical. **Revista Sítio Novo**, v. 5, n. 1, p. 100-117, 2020. <http://dx.doi.org/10.47236/2594-7036.2021.v5.i1.100-117p>

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **Irrigation and drainage paper**, v. 33, p. 257, 1979.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA HORTALIÇAS. **Manual de produção de hortaliças tradicionais**. Editor técnico: Nuno Rodrigo Madeira. Brasília, DF, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja - Região Central do Brasil 2014**. Série Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 16,265 p., 2013.

FEDERER, W. T. **Experimental design: Theory and application**. New York: MacMillan, 544p, 1955.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). AquaCrop Software, 2018.

FOSTER, T. & BROZOVIĆ, N. Simulating Crop-Water Production Functions Using Crop Growth Models to Support Water Policy Assessments, **Ecological Economics**, Elsevier, vol. 152(C), pages 9-21, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.05.019>

FOSTER, T.; BROZOVIĆ, N.; BUTLER, A.P.; NEALE, C.M.U.; RAES, D.; STEDUTO, P.; FERERES, E.; HSIAO, T.C. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. **Agricultural Water Management**, v. 181, p.18–22, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.015>

GARCÍA-VILA, M.; FERERES, E. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. **European Journal of Agronomy**, v.36, p. 21-31, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.08.003>

HE, D.; WANG, E.; WANG, J.; ROBERTSON, M. J. Data requirement for effective calibration of process-based crop models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 234, p. 136-148, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.12.015>

HIRAKURI, M. H. **Impactos econômicos de estresses na produção de soja da safra 2015/16**. Londrina: Embrapa Soja, Circular Técnica 125, 2016.

HIRAKURI, M. H.; LAZZAROTTO, J. J. **O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro**. Londrina: Embrapa Soja, 2014. 37 p.

HSIAO, T. C.; HENG, L.; STEDUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 448-459, 2009. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>

HYMOWITZ, T. (1970). On the domestication of the soybean. **Economic botany**, 24(4), 408-421.

JAME, Y. W.; CUTFORTH, W. Crop growth models for decision support systems. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v.76, n.1, p.9-19, 1996.

JAMIESON, P. D.; PORTER, J. R.; WILSON, D. R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. **Field crops research**, v. 27, n. 4, p. 337-350, 1991. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

JONES, J.W.; ANTLE, J.M.; BASSO, B.; BOOTE, K.J.; CONANT, R.T.; FOSTER, I.; GODFRAY, H.C.J.; HERRERO, M.; HOWITT, R.E.; JANSSEN, S.; KEATING, B.A.; MUNOZ-CARPENA, R.; PORTER, C.H.; ROSENZWEIG, C.; WHEELER, T.R. Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, v. 155, p.240–254, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.05.014>

KERSEBAUM, K.C.; BOOTE, K.J.; JORGENSEN, J.S.; NENDEL, C.; BINDI, M.; FRÜHAUF, C.; GAISER, T.; HOOGENBOOM, G.; KOLLAS, C.; OLESEN, J.E.; RÖTTER, R.P.; RUGET, F.; THORBURN, P.J.; TRNKA, M.; WEGEHENKEL, M. Analysis and classification of data sets for calibration and validation of agro-ecosystem models. **Environmental Modelling & Software**, v. 72, p. 402–417, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.05.009>

KIM, D.; KALUARACHCHI, J.J. A risk-based hydro-economic analysis for land and water management in water deficit and salinity affected farming regions. **Agricultural Water Management**, v. 166, p. 111–122, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.019>

KÖPPEN, W. **Climatologia: com um estudo dos climas da Terra**. México. Fondo Cult. Econ. 479p., 1948.

LI, F.; YU, D.; ZHAO, Y. Irrigation Scheduling Optimization for Cotton Based on the AquaCrop Model. **Water Resources Management**, v. 33, p. 39–55, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2087-1>

MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J. L.; WANDER FILHO, J. P.; NASSIF, D. S. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian sugarcane. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 2, p. 304-315, 2011. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0302>

MARTÍN, M. M. S.; OLESEN, J. E.; PORTER, J. R. A genotype, environment and management (GxExM) analysis of adaptation in winter wheat to climate change in Denmark. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 187, p. 1-13, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.11.009>

NASH, J. Eamonn; SUTCLIFFE, John V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. **Journal of hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

NASSIF, D. S. P., MARIN, F. R.; PALLONE FILHO, W. J.; RESENDE, R. S.; PELLEGRINO, G. Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 311-318, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000300001>

PEREIRA, E. M.; SILVA, F. M.; VAL, B. H. P.; NETO, A. P.; MAURO, A. O.; MARTINS, C. C.; UNÊDA-TREVISOLI, S. H. Canonical correlations between agronomic traits and seed physiological quality in segregating soybean populations. **Genetics and molecular research**, v. 16, n. 2, p. 1-11, 2017. <http://dx.doi.org/10.4238/gmr16029547>

R Core Team (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. **Reference Manual**, Chapter 3- AquaCrop, Version 7.0. Fao, Rome, 2023.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E., 2018a. **AquaCrop: Reference Manual Annexes**. Fao 87.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. Reference Manual: AquaCrop version 6.0, FAO, Rome, Italy, 2017. Disponível em: <<https://www.fao.org/documents/card/en/c/BR248E>> Acesso em: 05/01/2024.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **AquaCrop 4.0 – The FAO crop model to simulate yield response to water: chapter 3**. Roma, FAO, 2012. 125p.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. Crop water productivity. Calculation procedures and calibration guidance. **Aquacrop Version 3.0**. Rome: FAO, 2009.

ROCHA, R. S.; SILVA, J. A. L.; NEVES, J. A.; SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R. C. Desempenho Agronômico de variedades e linhagens de soja em condições de baixa latitude em Terezina-PI. **Revista de Ciências Agrárias**, Fortaleza, v.43, n.1, p.154-162, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000100019>

SEDIYAMA, T. (2015). **Melhoramento Genético da Soja**. 1. Ed., Londrina, PR: Editora Mecenas.

SILVA, F. L.; BORÉM, A.; SEDIYAMA, T.; CAMARA, G. **Soja: do plantio à colheita**. 2. Ed., São Paulo, SP: Editora Oficina de Texto, 2022.

SILVA, F.; BORÉM, A.; SEDIYAMA, T.; LUDKE, W. **Melhoramento da Soja**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2017.

SOARES, I. O.; BIANCHI, M. C.; BRUZI, A. T.; GESTEIRA, G. D. S.; SILVA, K. B.; GUILHERME, S. R.; CIANZIO, S. R. Genetic and phenotypic parameters associated with soybean progenies in a recurrent selection program. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, 20(4), 2020. <https://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n4a59>

STEDUTO, P. FAO 66 - **Crop Yield Response to Water**. Rome: FAO, 2012.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; RAES, D.; FERERES, E. Aquacrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 426–437, 2009.

THRANE, M.; PAULSEN, P. V.; ORCUTT, M. W.; KRIEGER, T. M. Soy protein: impacts, production, and applications. In: NADATHUR, S. R.; WANASUNDARA, J. P. D. SCANLIN, L. (Eds.) **Sustainable protein sources**, 2017. p. 23–45. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802778-3.00002-0>

UMBURANAS, R. C.; YOKOYAMA, A. H.; BALENA, L.; DOURADO-NETO, D.; TEIXEIRA, W. F.; ZITO, R. K.; REICHARDT, K.; KAWAKAMI, J. Soybean yield in different sowing dates and seeding rates in a subtropical environment. **International Journal of Plant Production**, v. 13, n. 2, p. 117-128, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42106-019-00040-0>

USDA, Unites States Department of Agriculture. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads> Acesso em: 02/03/24.

VAN ITTERSUM, M.K.; CASSMAN, K.G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.; HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance—a review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4-17, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>